



Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Azcapotzalco

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
POSGRADO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

COMPORTAMIENTO A CORTANTE DE TRABES
ACARTELADAS CONTINUAS DE CONCRETO
REFORZADO SUJETAS A CARGAS CÍCLICAS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

P R E S E N T A

LUIS ANGEL URBINA CALIFORNIAS

DIRECTOR DE TESIS: **DR. ARTURO TENA COLUNGA**

MÉXICO, D. F.

DICIEMBRE DE 2013

A Mis Padres

Ángel Urbina Rios
D. Olga Californias Valencia[†]

A Mis Hermanos

Macleen, Leonel y Nanyeli

A Mis Sobrinos

Kathia, Adriana, Dalai, Jania, Isaac, Uriel, Yael y Leonel Jr.

*Con dedicatoria especial para mi ángel (D.O.C.V), que se me sigue cuidando desde donde
estés, y recordare tu última frase que me enseñaste:*

“JESÚS, YO CONFÍO EN TI”

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a las siguientes personas y instituciones, su colaboración en el desarrollo de este proyecto.

A la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, en especial al Área de Estructuras y al Laboratorio de Estructuras por brindar y facilitar sus instalaciones que permitieron la culminación y elaboración de este trabajo.

Al CONACYT, por haber patrocinado este proyecto de investigación y otorgado una beca durante el estudio de la Maestría en Ingeniería Estructural.

Al Dr. Manuel E. Ruiz Sandoval Hernández y al Dr. Héctor Sánchez Sánchez por su valiosa colaboración en la revisión de esta tesis.

Se hace un especial reconocimiento al Dr. Arturo Tena Colunga por su confianza depositada en un servidor, para ser su tesista de licenciatura y de posgrado, por el apoyo y asesoramiento que otorgó durante el desarrollo de la tesis y durante el estudio de la Maestría. Al Dr. Hans Archundia Aranda por su valioso apoyo en el proceso de este proyecto experimental y de la tesis.

Durante la elaboración de los trabajos experimentales, intervienen un gran número de personas, este proyecto no es la excepción. A las siguientes personas les agradezco la ayuda y comentarios que proporcionaron en alguna etapa de este proyecto.

Maestro de laboratorio Rubén Barrera, Técnico José Luis Caballero, Técnico Juan Mateos y Sra. Silvia Ledesma por su apoyo institucional en el laboratorio. Al Ing. Edznab López, por apoyarnos mutuamente en nuestros trabajos de tesis. A los ingenieros Ricardo Flores, Gadiel Martínez, Aldo Mendoza, Enrique Huerta, Juan Carlos Rodríguez, Mario Medina, Jovani Martínez, Sergio Reyes y Armando Colín, quienes colaboraron tanto en sus talleres de ingeniería civil como en su servicio social; a todos los alumnos y alumnas que participaron en este proyecto como parte de sus talleres de ingeniería civil: Ing. Paola Martínez, Saraí Cisneros, Miriam Hernández, Erik González, Carolina Viatela, Irving Chávez, Erik Sánchez, Francisco Javier Juárez, Fernando Arriaga, José Islas, Juan Flores, Juan Diego Sánchez, Julio Castaños, Oliver de Jesús Narcizo, Saúl Rico, Carlos Morales, Jovani Cathi, Jesús Iram Aranda, Manuel de Jesús Lopéz, Alex Eduardo Cabrera, Abigail Velasco, Eduardo Ayala, Emmanuel Martínez, Jonathan Zendejas, Isaac Marin, Alan Jhonatan Herrera, Alan Hernández, Marco Antonio Islas, Jorge Armando Rodríguez, Edgar Ricardo Rojas, Erick Esquivel, Juan Carlos Antaño. También a todas las personas que participaron indirectamente en el desarrollo del proyecto.

Índice

Capítulo 1	Antecedentes	1
1.1	Introducción	1
1.2	Investigaciones previas sobre el comportamiento a cortante de trabes acarteladas	5
1.2.1	Debaiky y El-Niema (1982)	6
1.2.2	MacLeod y Houmsi (1994)	8
1.2.3	Archundia, Tena y González (2004-2007)	9
1.2.4	Archundia, Grande, Tena y González (2005-2007)	13
Capítulo 2	Alcance del proyecto experimental	21
Capítulo 3	Criterios de diseño de los especímenes de prueba	23
3.1	Introducción	23
3.2	Geometría de los especímenes	25
3.3	Condición de carga para los especímenes	26
3.4	Identificación de los especímenes	27
3.5	Armados de los especímenes de prueba	29
3.6	Diseño de los especímenes de prueba	40
3.6.1	Resistencia a cortante	40
Capítulo 4	Programa experimental	48
4.1	Introducción	48
4.2	Construcción de los especímenes	48
4.2.1	Armado de los especímenes	48
4.2.2	Diseño de la cimbra	48
4.2.3	Colado de los especímenes	52
4.2.4	Descimbrado de los especímenes	55
4.2.5	Preparación de los especímenes de prueba	55
4.3	Instrumentación de los especímenes de prueba	56
4.4	Dispositivo de carga y adquisición de datos	60
Capítulo 5	Metodología experimental	65
5.1	Introducción	65
5.2	Preparación de los especímenes de prueba	65
5.3	Historia del desplazamiento	66

5.4	Registro del agrietamiento	67
Capítulo 6 Elementos con refuerzo transversal: Resultados experimentales		69
6.1	Introducción	69
6.2	Comportamiento general	69
6.2.1	Primer agrietamiento diagonal	69
6.2.2	Último o de falla	70
6.2.3	Colapso	70
6.3	Elemento TASCV3 α 1-R1c	71
6.3.1	Evolución del daño	73
6.3.2	Comportamiento carga deflexión	76
6.3.3	Análisis de instrumentación interna	78
6.3.3.1	Refuerzo longitudinal en trabe	78
6.3.3.2	Refuerzo transversal	81
6.3.3.3	Refuerzo longitudinal y transversal en la columna	82
6.4	Elemento TASCV3 α 2-R1c	83
6.4.1	Evolución del daño	85
6.4.2	Comportamiento carga deflexión	89
6.4.3	Análisis de instrumentación interna	90
6.4.3.1	Refuerzo longitudinal en trabe	90
6.4.3.2	Refuerzo transversal	93
6.4.3.3	Refuerzo longitudinal y transversal en la columna	94
6.5	Elemento TASCV3 α 3-R1c	95
6.5.1	Evolución del daño	96
6.5.2	Comportamiento carga deflexión	100
6.5.3	Análisis de instrumentación interna	102
6.5.3.1	Refuerzo longitudinal en trabe	102
6.5.3.2	Refuerzo transversal	104
6.5.3.3	Refuerzo longitudinal y transversal en la columna	105
6.6	Elemento TASCV3 α 4-R1c	107
6.6.1	Evolución del daño	108
6.6.2	Comportamiento carga deflexión	112
6.6.3	Análisis de instrumentación interna	114
6.6.3.1	Refuerzo longitudinal en trabe	114
6.6.3.2	Refuerzo transversal	116
6.6.3.3	Refuerzo longitudinal y transversal en la columna	117
6.7	Elemento TASCV3 α 0-R1c	119
6.7.1	Evolución del daño	120
6.7.2	Comportamiento carga deflexión	123

6.7.3	Análisis de instrumentación interna	125
6.7.3.1	Refuerzo longitudinal en trabe	125
6.7.3.2	Refuerzo transversal	128
6.7.3.3	Refuerzo longitudinal y transversal en la columna	129
Capítulo 7	Análisis de resultados	131
7.1	Introducción	131
7.2	Resistencia	131
7.3	Degradación de la rigidez	135
7.4	Disipación de energía	138
7.5	Inclinación de grietas	145
Capítulo 8	Resumen y conclusiones	147
8.1	Resumen	147
8.2	Conclusiones	147
Referencias		149
Apéndice A		151
A.1	Introducción	151
A.2	Concreto	151

Capítulo 1

Antecedentes

1.1 Introducción

Las trabes acarteladas de concreto reforzado, TACR, son atractivas como alternativa estructural para edificios de dimensiones importantes y para puentes, ya que conceptualmente proporcionan algunas ventajas sobre las trabes de concreto prismáticas, entre las cuales se pueden mencionar las siguientes (Tena-Colunga *et al.* 2008):

- Aumentar la rigidez lateral de la estructura.
- Optimización del concreto utilizado.
- Optimización del acero de refuerzo.
- Reducir el peso de la estructura.
- Facilitar la ubicación de las diferentes instalaciones (sanitarias, equipo de aire acondicionado, cableado eléctrico, etc.).
- Razones de estética.

La mayor desventaja de estos elementos estructurales es que su cimbrado y armado es más laborioso que el de las trabes prismáticas, lo cual redundaría en un mayor costo por este concepto. Sin embargo, esta no ha sido históricamente una limitante para su uso en México, donde se han utilizado extensamente en puentes y en edificios desde la primera mitad del siglo XX (Tena-Colunga *et al.* 2008).

Como lo menciona Tena (2008), el uso de las TACR en edificios y puentes a nivel mundial no es nuevo; sin embargo, por razones económicas relacionadas con el costo de la mano de obra, su uso en países del primer mundo es más común en puentes de todo tipo, mientras que en edificios se utilizan principalmente en México, y en otros países latinoamericanos, como Ecuador.

En la actualidad se han detectado en la Ciudad de México y zona conurbana edificios de concreto reforzado y presforzado de importantes dimensiones, que utilizan trabes acarteladas como alternativa estructural, tal y como se puede observar en las figuras 1.1 a 1.3. A la vez se han detectado puentes, que en su sistema de apoyo con base en marcos de concreto reforzado utilizan trabes acarteladas (figura 1.4) y actualmente se han detectado construcciones con base en trabes acarteladas de concreto postensado y presforzado tanto en edificios como en puentes respectivamente (figuras 1.5 y 1.6).



Figura 1.1 Casa ubicada en Tezoyuca Estado de México.



Figura 1.2 Edificio ubicado en calzada Legaria, Delegación Miguel Hidalgo. Obra nueva.



Figura 1.3 Edificio ubicado en Av. Granjas. (Cerca de la UAM-A). Arena México

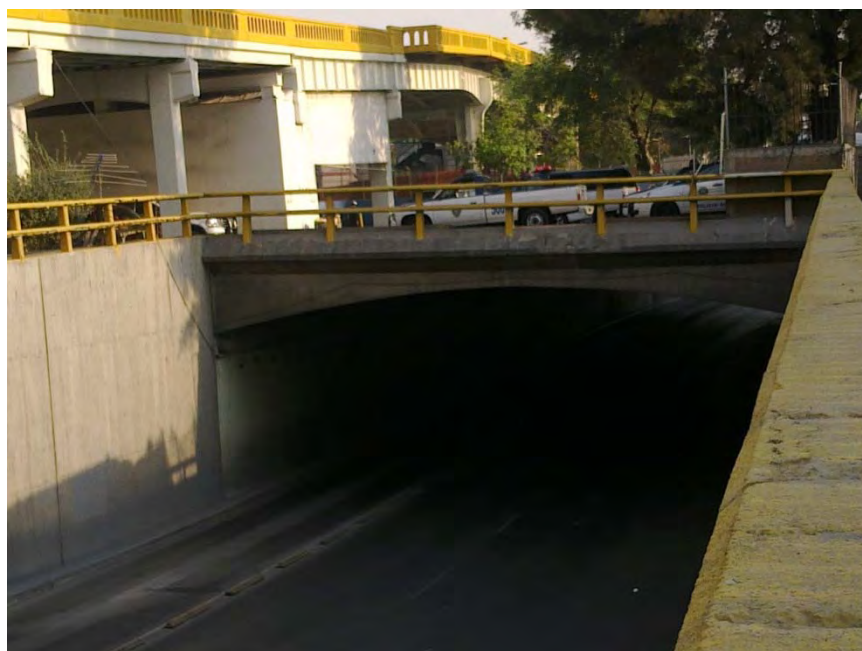


Figura 1.4 Puente vehicular en Insurgentes norte a la altura de la estación del metrobus Buenavista.



Figura 1.5 Autopista “Rio de los remedios-Ecatepec” . Distribuidor vial Vallejo-Cien Metrobus



Figura 1.6 Edificación a base de traveses acartelados postensados a un lado de la estación del tren suburbano en Buenavista e Insurgentes.

1.2. Investigaciones previas sobre el comportamiento a cortante de trabes acarteladas

Como reporta Tena-Colunga *et al.* (2008), las investigaciones experimentales sobre el comportamiento de trabes acarteladas de concreto reforzado (TACR) son muy escasas, y todas se han limitado a estudiar su mecanismo resistente a cortante, a pesar de las grandiosas ventajas que este tipo de trabes ofrecen. La gran mayoría de los experimentos se han hecho en trabes simplemente apoyadas ante carga estática monótona creciente, como los experimentos reportados por Debaiky y El-Niema en 1982, El-Niema en 1988, Archundia en 2004, Archundia *et al.* en 2005 y 2006, Grande en 2007 y Tena-Colunga *et al.* (2008).

Sólo existe un estudio disponible para una condición de apoyo continuo, que es el reportado por MacLeod y Houmsi en 1994, pero tiene las limitantes de haberse realizado también ante carga estática monótona creciente y para sólo cinco cartelas sin refuerzo por cortante. Los únicos ensayos ante carga cíclica realizados hasta la fecha han sido en trabes acarteladas con condición de apoyo simple con y sin refuerzo por cortante, y que han sido reportados por Grande en 2005 y 2007, Archundia *et al.* en 2007 y 2008 y Tena-Colunga y colaboradores en 2007 (Tena 2008).

Como lo señala Tena (2008), no es sorprendente que en varios de los principales libros especializados sobre el comportamiento y diseño de elementos de concreto reforzado no se trate el tema de trabes acarteladas o esto se haga de una manera muy superficial. Libros de concreto reforzado como el MacGregor (1997) y el de Nilson (1999) abordan ligeramente el tema (página y media en promedio), proporcionando ecuaciones teóricas para estimar la contribución del concreto en la resistencia a cortante de las TACR. Estas ecuaciones están basadas en los planteamientos clásicos de trabes prismáticas, pero modificados para considerar la variación del peralte efectivo en la longitud de las cartelas (MacGregor 1997, Nilson 1999). Sin embargo, como honestamente señala Nilson en su libro: “existe muy poca investigación referente a la resistencia a cortante de vigas con altura variable” (Archundia *et al.* 2006). Por otra parte, los reglamentos más utilizados para construir en México, como el Reglamento Americano del Concreto 2005 (ACI-318-05) y las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño de Estructuras de Concreto 2004 (NTCC-04), no proporcionan recomendaciones específicas para el diseño a flexión y a cortante de las trabes a carteladas de concreto reforzado.

El proyecto de investigación experimental procede de las investigaciones y ensayos de Tena y colaboradores en 2004 a 2007 como una segunda etapa. El alcance del mismo es para aportar, corroborar y calibrar la ecuación de la resistencia a cortante de trabes acarteladas de concreto reforzado propuesta por Tena y colaboradores, la cual se presenta a continuación:

$$V_n = V_{pc} + V_{ri} + V_s \quad 1.1$$

donde la contribución de concreto (V_{pc}), la contribución de refuerzo inclinado (V_{ri}) y la contribución del acero longitudinal (V_s) se calculan como:

$$V_{pc} = \left(0.5\sqrt{f'_c} + 176\rho_w \frac{V_u d_{cr}}{M_u} \right) b d_{cr} \quad 1.2$$

$$V_{ri} = \pm \frac{M_{cr}}{d_{cr}} \tan \alpha \quad 1.3$$

$$V_s = \frac{A_v f_{yv} d_{cr}}{s \tan(45-\alpha)} \quad 1.4$$

donde f'_c es la resistencia nominal a compresión del concreto, ρ_w , es la cuantía de refuerzo longitudinal, V_u y M_u , son respectivamente el cortante último y momento último nominales aplicados a la sección crítica, A_v es la suma de las áreas de las ramas de los estribos, separados una distancia, s , f_{yv} es el esfuerzo de fluencia del acero del refuerzo transversal y d_{cr} es el peralte efectivo equivalente de la sección acartelada crítica, la cual se define como:

$$d_{cr} = d_{min} [1 + 1.35 \tan \alpha] \leq \left[\left(\frac{h_{max} h_{min} - h_{max}^2}{2l_h} + h_{max} \right) - r \right] \quad 1.5$$

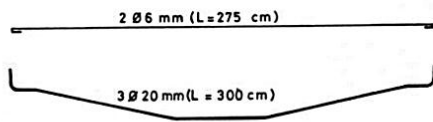
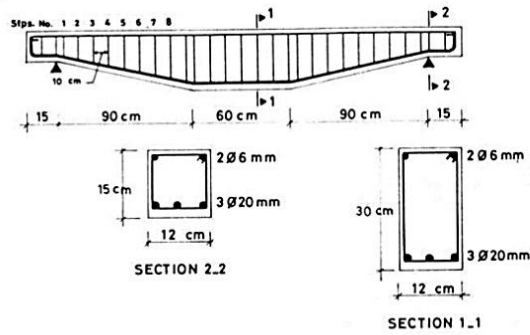
donde l_h es la longitud del acartelamiento, r es el recubrimiento del refuerzo longitudinal, h_{max} es el peralte total en los extremos, h_{min} es el peralte correspondiente al tercio medio y α es el ángulo correspondiente al acartelamiento.

La ecuación propuesta surgió de las ecuaciones de Debaiky y El-Niema (1982) y MacLeod y Houmsi (1994), ya que éstas fueron derivadas de la ecuación de equilibrio de la sección de la trabe a la falla. Estas mismas hipótesis se consideraron, pero la ecuación fue derivada de manera que fuera similar a la ecuación del reglamento American Concrete Institute (A.C.I. 318-05) para trabes prismáticas, es decir, cuando $\alpha=0$, la ecuación propuesta por Tena-Colunga *et al.* (2008) coincide con la ecuación para trabes prismáticas del A.C.I.

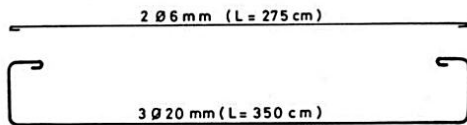
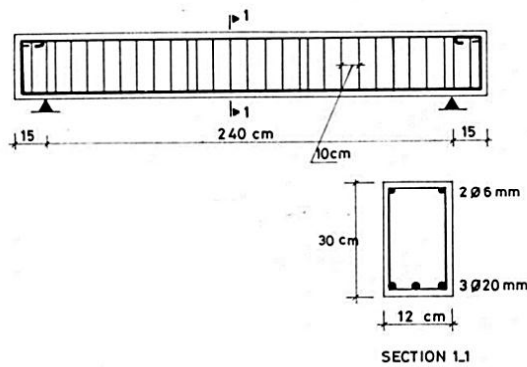
1.2.1 Debaiky y El-Niema (1982)

El estudio presentado por Debaiky y El-Niema fue el entender y comprender el comportamiento y la resistencia a cortante de trabes acarteladas de concreto reforzado simplemente apoyadas incluyendo refuerzo transversal y con diferentes ángulos de acartelamiento. Se realizaron 33 especímenes con seis diferentes geometrías, arreglos de refuerzo longitudinal y cuantías de refuerzo transversal. Los ángulos de acartelamiento de las vigas fueron de cero, cuatro y nueve grados, En este trabajo se observaron que los peraltes de las vigas variaron linealmente a lo largo del claro de cortante donde dicho claro está tomado entre el punto de apoyo y el punto de aplicación de la carga y, que en la parte media de las vigas entre los dos puntos donde la carga fue aplicada el peralte fue

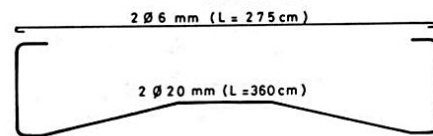
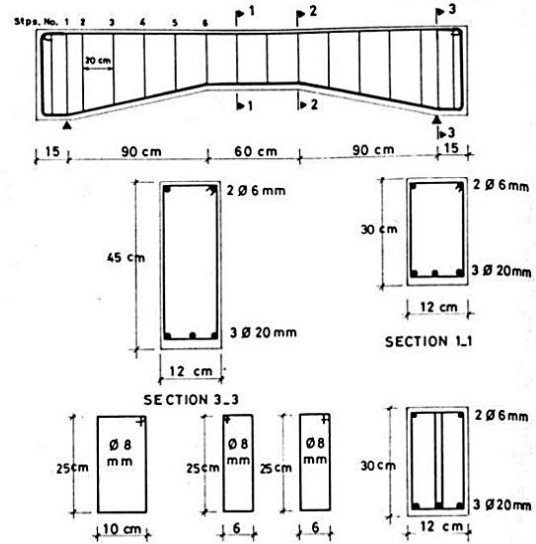
constante. En la figura 1.7 se presentan los especímenes utilizados por Debaiky y El-Niema (1982).



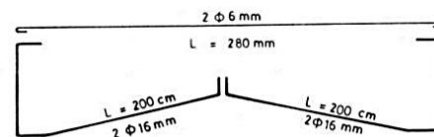
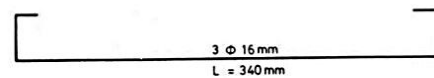
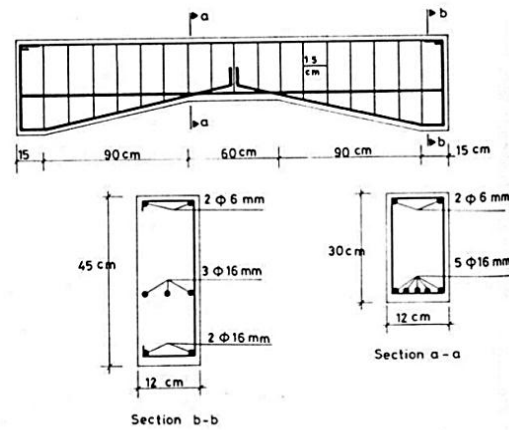
Reinforcement details for D_1



Reinforcement details for D_2



Reinforcement details for D_3



Reinforcement details for Beam E_1

Figura 1.7 Modelos utilizados durante el estudio

De acuerdo a los resultados de los ensayos se observa que:

- El ángulo de acartelamiento de la grieta principal es pequeño para vigas donde el peralte es máximo en el tercio central y se incrementa cuando el peralte es máximo en el soporte.
- En cuanto al claro cortante, se tiene que la resistencia última se incrementa con la reducción del claro cortante y que el incremento es directamente proporcional al porcentaje de refuerzo transversal. A la vez se tiene un incremento en el porcentaje de refuerzo longitudinal.
- La contribución a cortante, y el refuerzo longitudinal están en función del ángulo de acartelamiento, mientras que la contribución del acero de refuerzo transversal no lo está.
- No existen diferencias en el cortante último que resisten las trabes acarteladas con el mismo ángulo de acartelamiento, independientemente de la ubicación del mayor peralte, ya sea en los extremos o en la parte central de la trabe.

1.2.2 MacLeod y Houmsi (1994)

MacLeod y Houmsi (1994) presentaron un estudio donde se estimó la resistencia a cortante en vigas acarteladas sin refuerzo transversal. Este método experimentalmente es válido sólo para cartelas cuyos ángulos de inclinación se encuentren en un intervalo de 4.7° a 10.4° , encontrando resultados satisfactorios para predecir la fuerza de resistencia a cortante en vigas de sección variable sin refuerzo transversal a cortante. Las trabes fueron ensayadas en doble voladizo (figura 1.8), de tal forma que se modelara de una manera real el comportamiento de trabes continuas, es decir, evaluando la resistencia a cortante en la zona donde el momento flexionante (negativo) es máximo.

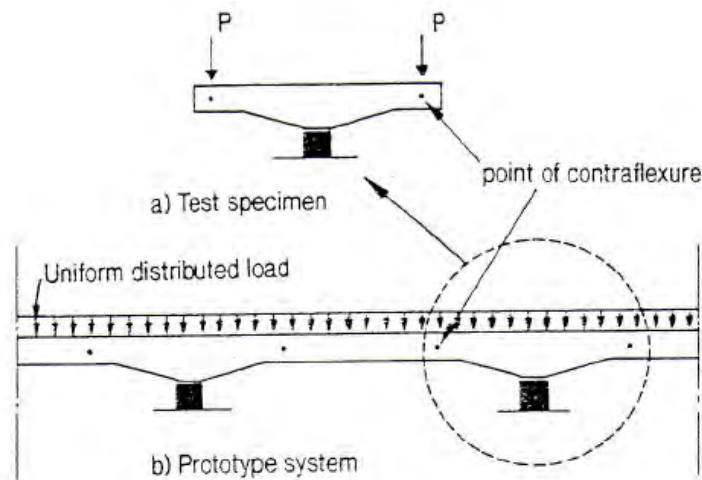


Figura 1.8 Especimen empleado por MacLeod y Houmsi

Los resultados más relevantes del estudio de MacLeod y Houmsi (1994) son:

- Al aumentar el ángulo de acartelamiento, el número de grietas de flexión aumentan, la deflexión máxima se incrementa y también conforme el ángulo de acartelamiento aumenta, la acción de un puntal tiende a desarrollarse en la cartela, y más de una grieta diagonal tiende a formarse.
- Después que la grieta diagonal se traslada hacia la zona de compresión, la propagación de la grieta diagonal encuentra resistencia, la cual se incrementa conforme el acartelamiento aumenta.
- Las grietas a flexión en las vigas acarteladas se ensancharon y propagaron más que en aquellas que tenían peralte constante.
- En general, la deformación en el refuerzo longitudinal para todas las vigas estuvo por debajo del límite de fluencia.
- La resistencia a cortante y la ductilidad mejoran al reducir el volumen de concreto y al incrementar el ángulo de acartelamiento.
- El peralte crítico de diseño en trabes acarteladas continuas se encuentra ubicado a una distancia de 2.7 veces el peralte efectivo de la sección transversal que corresponde al tramo prismático (peralte mínimo), medido desde el punto de inflexión hacia el extremo de la trabe.

1.2.3 Archundia, Tena y González (2004-2007)

Presentaron un estudio de 10 trabes acarteladas de concreto reforzado simplemente apoyadas (ocho acarteladas y dos prismáticas), variando el ángulo de acartelamiento de

0°, 3°, 6°, 9° y 12°. La longitud de las cartelas fue 1/3 del claro efectivo, debido a que es casi una constante en las construcciones de la Ciudad de México, (como lo mencionó Tena en 1994 (Grande 2007)). La geometría general de las trabes acarteladas ensayadas, y la ubicación de las cargas se presentan en la figura 1.9. Las cargas fueron monotónicas y se aplicaron a 10 cm del vértice que forma con la intersección del tramo acartelado y con el tramo prismático hacia el centro del claro.

Los especímenes se diseñaron para fallar por cortante de acuerdo a lo establecido en la sección 2.5.2.2 de las Normas Técnicas Complementarias de Concreto 2004 (NTCC-04) para trabes prismáticas. Las propiedades de los materiales fueron, para el concreto, un esfuerzo a la compresión $f'_c=250\text{kg/cm}^2$, y para el acero $f'_y=4200\text{kg/cm}^2$.

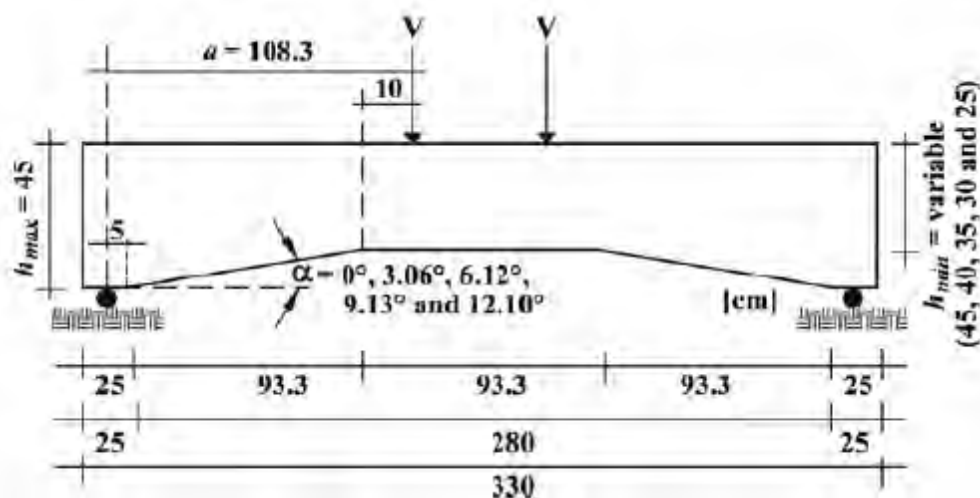


Figura 1.9 Dimensiones generales y ubicación de las cargas (Archundia *et al.* 2004).

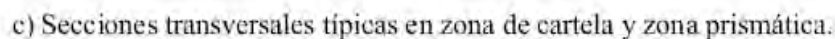
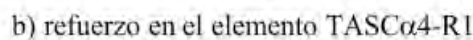
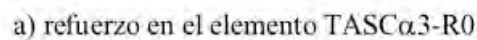
La resistencia nominal a cortante se calculó suponiendo dos peraltes efectivos críticos en la longitud de las cartelas: a) el correspondiente al peralte mínimo, y b) el que se ubica a una distancia del apoyo.

A los cinco especímenes con acero transversal se les proporcionó un refuerzo mínimo en función del peralte de apoyo como lo establecen las NTCC-04, dicho refuerzo transversal consistió en estribos de dos ramas del # 2.5, espaciados a cada 18.5cm en el claro de cortante. También, en los vértices se proveyó de un refuerzo transversal local para tomar la componente vertical que ocasiona el cambio de dirección del acero longitudinal inferior.

En los especímenes sin refuerzo por cortante, sólo se proporcionaron cuatro estribos para sujetar las varillas longitudinales. El armado longitudinal de los diez especímenes de prueba fue el mismo en todos los elementos y fue continuo en toda su longitud siguiendo la geometría de las trabes como se observa en la figura 1.10, de esta manera el acero del lecho inferior fue de 4#8 y el acero del lecho superior de 3#8.

A las trabes acarteladas con refuerzo transversal se les proveyó un refuerzo adicional en la zona del vértice, para evitar una falla local debida a la fuerza vertical originada por el

Durante el ensaye de las trabes, se observaron tres cortantes característicos: 1) el que produjo el primer agrietamiento diagonal, V_{agr} , 2) El que se consideró como cortante que provocó la falla, V_u , 3) El cortante debido al colapso, V_{clps} .



11

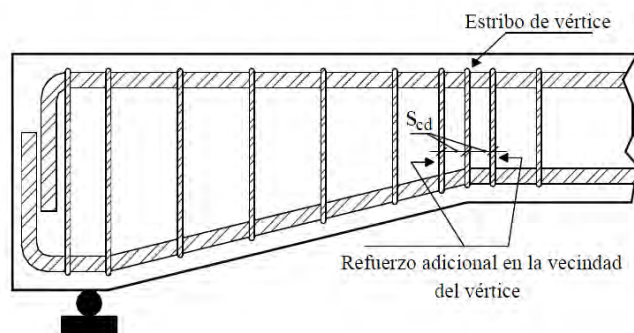


Figura 1.11 Refuerzo en la vecindad del vértice en los elementos reforzados (Archundia *et al.* 2004).

En el estudio se pudo constatar que al comparar el comportamiento de las travesas con y sin estribos y con el mismo ángulo de acartelamiento, el refuerzo transversal tiene menor contribución en la resistencia a cortante; además, se comprobó que la presencia de estribos no modifica la rigidez inicial de las travesas acarteladas de concreto, como se muestra en la figura 1.12.

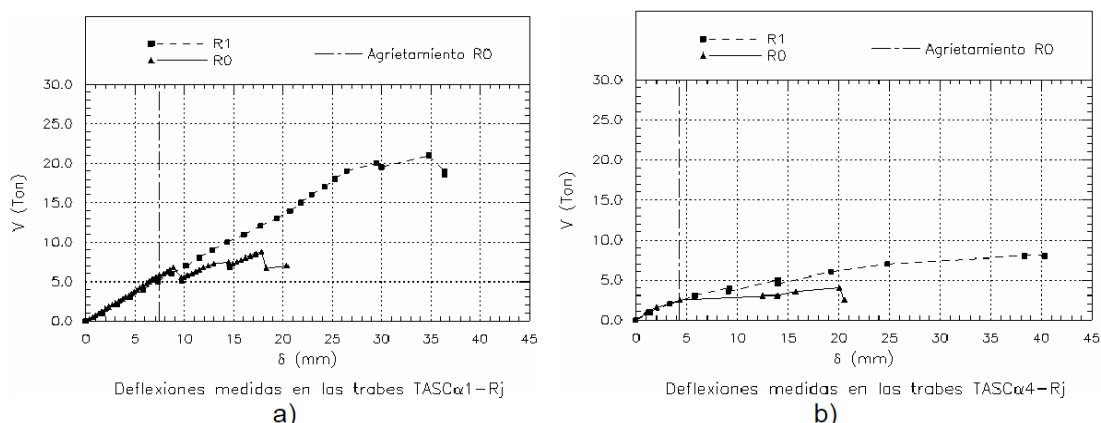


Figura 1.12 Comparación de la respuesta en travesas acarteladas de concreto reforzado: a) sin estribos y b) con estribos (Archundia *et al.* 2004).

De acuerdo con los ensayos experimentales realizados, se propuso una ecuación para calcular la resistencia a cortante de travesas acarteladas de concreto reforzado sometidas a carga estática (Archundia *et al.* 2004). Esta propuesta mejoró la obtención del cortante al compararlo con otras formulaciones realizadas a partir de evidencia experimental (Debaiky y El-Niema 1982, El-Niema 1988, MacLeod y Houmsi 1994), o formuladas de consideraciones puramente analíticas (Park y Paulay 1998, Nielson 1999 y 2004, MacGregor y Wight 2005).

Los resultados más relevantes de este trabajo son:

- La geometría de las trabes acarteladas de concreto reforzado modifica el comportamiento en comparación con las trabes prismáticas; al dejar una mejor distribución del daño en el claro de cortante, el cual se debió al mecanismo de arco formado.
- Las trabes acarteladas poseen mayor capacidad de deformación a cortante que las trabes de sección constante sin embargo, adquieren una menor resistencia a cortante que las trabes prismáticas.
- La resistencia última a cortante en las trabes acarteladas depende del ángulo de acartelamiento, particularmente de tres parámetros: 1) la contribución de la fuerza vertical introducida por la inclinación del acero longitudinal, 2) la contribución del concreto, V_{pc} y, 3) la contribución del refuerzo transversal.

1.2.4 Archundia, Grande, Tena y González (2005-2007)

Este estudio presenta y discute los resultados experimentales del ensaye de cinco trabes acarteladas sin refuerzo transversal sometidas ante cargas cíclicas. Los ensayos mostraron y corroboraron lo observado en TACR sometidas a carga monotónica (Archundia *et al.* 2004,2005), es decir, que las cartelas modifican la falla frágil por cortante, que es muy común en los elementos de sección prismática, así como también el aumento del acartelamiento influye en parámetros estructurales importantes, tales como resistencia, rigidez, índice de daño y capacidad de deformación.

Las trabes de sección variable estudiadas son similares en geometría y en refuerzo a los reportados en Archundia *et al.* (2004) ensayados ante carga estática. Los ángulos de acartelamiento (α) variaron de 0° a 12°, como se muestra en la figura 1.13. Las trabes se ensayaron simplemente apoyadas colocando y aplicando las cargas reversibles a 10 cm del vértice, es decir, en la unión que se forma con el tramo acartelado y el tramo de sección constante. Las cargas actuaron en placas de acero de 10x2.54x22 cm. Para uniformizar la superficie de contacto con la fuerza externa aplicada, se colocó una junta de neopreno entre la trabe acartelada y las placas de acero.

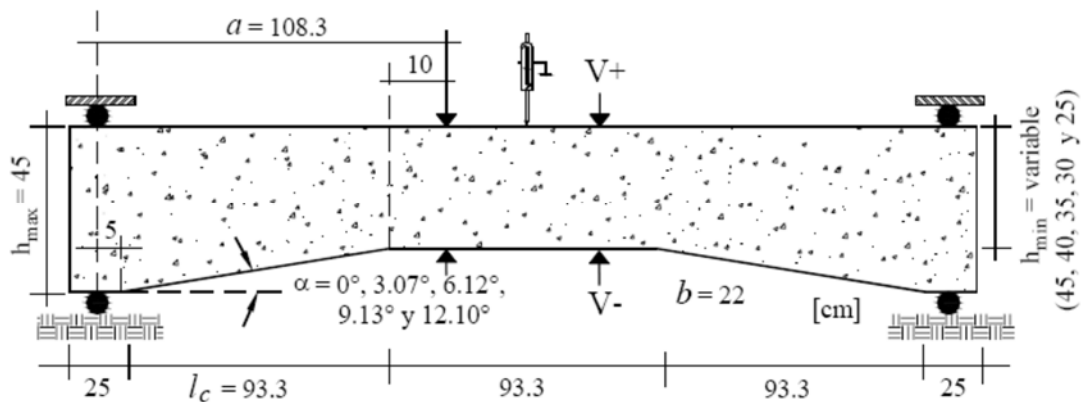


Figura 1.13 Dimensiones generales y aplicación de la carga (Archundia *et al.* 2007)

Los especímenes se diseñaron para favorecer la falla por cortante ante momento negativo y positivo. El diseño por flexión se realizó conforme a las hipótesis de las NTCC-2004 para trabes prismáticas. El cortante se determinó mediante la recomendación de Tena *et al.* (2008) para trabes acarteladas.

El armado longitudinal fue similar al de Archundia *et al.* (2005) para trabes acarteladas de concreto reforzado ensayadas mediante cargas monotónicas. Como se muestra en la figura 1.14, se utilizaron cuatro estribos en las trabes para sujetar el armado longitudinal, los cuales fueron colocados fuera del claro cortante; los autores comprobaron que los estribos no participaron en la resistencia.

Los elementos se instrumentaron internamente mediante deformímetros eléctricos (strain gage) colocado cada uno en el acero longitudinal. Asimismo, se colocó otro en el estribo del tramo central, que corresponden al mismo lado donde se colocaron los del refuerzo longitudinal, como se observa en la figura 1.14. La deflexión se midió con un transductor de desplazamiento ubicado en la parte central de las trabes. El cortante aplicado se midió con celdas de carga colocadas en cada uno de los cuatro puntos donde fue aplicada la carga, como se muestra en la figura 1.15.

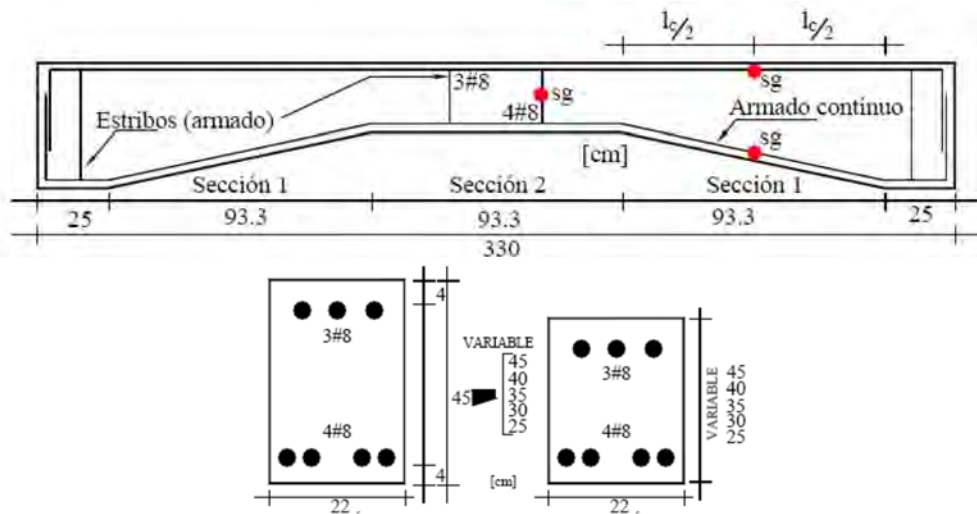


Figura 1.14 Refuerzo y sección transversal de los especímenes (Archundia *et al.* 2007)

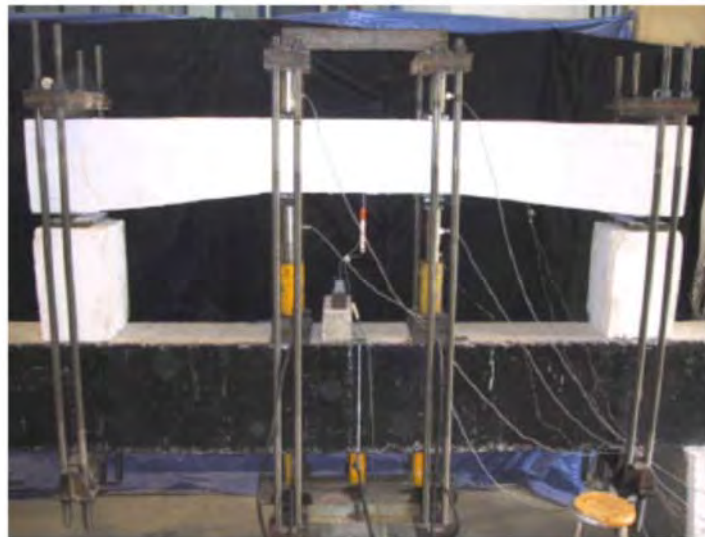


Figura 1.15 Dispositivo de prueba (Archundia *et al.* 2007)

Los ensayos se controlaron por el desplazamiento (δ) medido en el centro del claro, con incrementos de 3 mm que permitieron capturar el primer agrietamiento diagonal y de falla. El patrón de desplazamientos utilizado en todos los ensayos donde las deflexiones positivas impusieron un momento positivo a los especímenes, el cual se muestra en la figura 1.16. Los ensayos de los elementos se terminaron cuando perdieron la capacidad de carga.

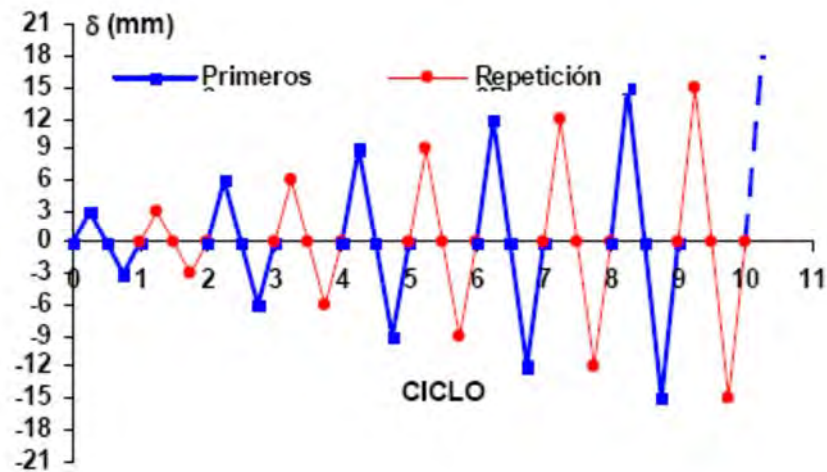


Figura 1.16 Patrón de desplazamientos (Archundia *et al.* 2007)

En la figura 1.17 se presentan las curvas de histéresis obtenidas, donde el cortante, V , y la deflexión medida en el centro del claro de los elementos, (δ), corresponden al extremo acartelado donde se presentó la falla por cortante.

Debido a que los elementos se sometieron al mismo patrón de desplazamiento, Archundia *et al.* dedujeron que existe una tendencia al aumentar el ángulo de acartelamiento disminuye la resistencia a cortante y rigidez, así como también aumenta la capacidad de deformación, y a la vez se permite acomodar un mayor número de ciclos.

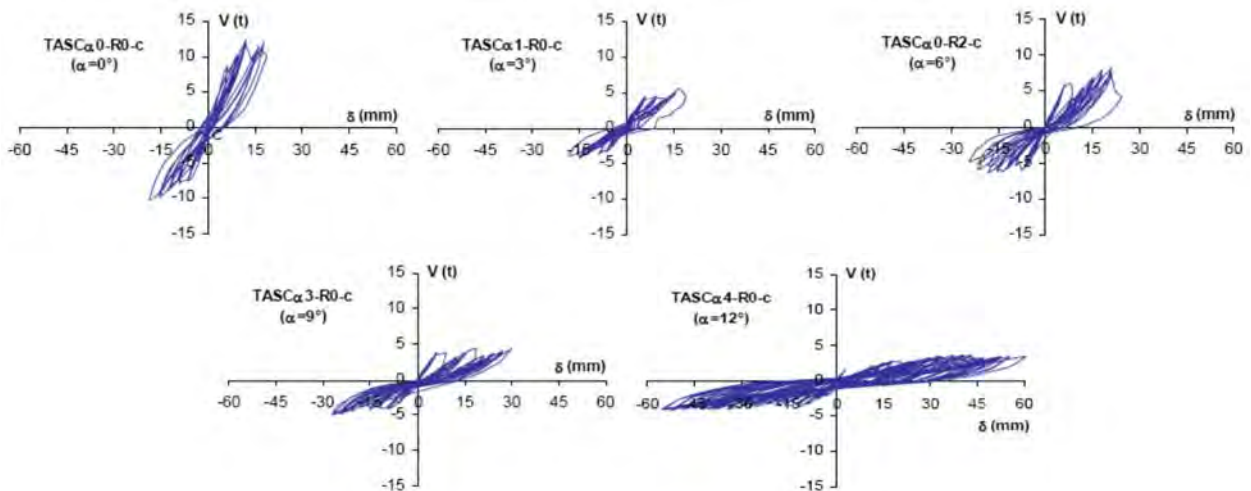


Figura 1.17 Curvas de histéresis (Archundia *et al.* 2007)

Para los especímenes ensayados se obtuvieron deflexiones asociadas al primer agrietamiento diagonal, δ_{agr} , colapso δ_{clps} y último, δ_u , así como también los cortantes correspondientes donde se presentó la falla (V_{agr} , V_{clps} y V_u).

El primer agrietamiento diagonal se presentó en la zona de los vértices, como se había presentado en pruebas previas ante carga monótona. Durante la prueba se observó la aparición de la primera grieta diagonal, como se muestra en la figura 1.18^a y el agrietamiento último, como se muestra en la figura 1.18b. La falla por cortante de lado donde se produjo el primer agrietamiento diagonal. Una vez alcanzada la falla por cortante, se continuó con el patrón de desplazamientos hasta que los especímenes perdieran la capacidad de carga. En este estado se asocia un daño estructural excesivo, como se aprecia en la figura 1.18c.

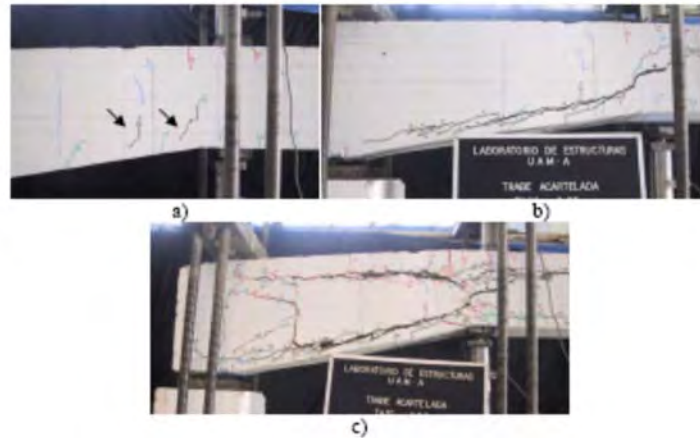


Figura 1.18 Estados característicos: a) primer agrietamiento diagonal, b) agrietamiento de falla, y c) colapso (Archundia *et al.* 2007)

Las envolventes de los ciclos primeros y de repetición se muestran en la figura 1.19. En las gráficas se indican las deflexiones al primer agrietamiento diagonal y falla, y se observa la resistencia a cortante esperada (V_{nTA}); también se muestra que ambas envolventes son idénticas hasta la presencia del primer agrietamiento diagonal, excepto la del elemento prismático. Además, es evidente que la respuesta hasta el primer agrietamiento es prácticamente lineal a excepción del elemento con ángulo de acartelamiento de tres grados. A partir del primer agrietamiento diagonal, la envolvente de los ciclos de repetición tiende a ir por debajo de la envolvente de los primeros ciclos, presentándose la mayor diferencia en las demandas cercanas a la falla.

A partir de la observación de las deflexiones mostradas en la figura 1.19 se aprecia que el acartelamiento no modifica el desplazamiento en el cual se presentó el primer agrietamiento diagonal; solamente el elemento con el mayor ángulo de acartelamiento presentó el primer agrietamiento a una demanda de desplazamiento menor que el resto de los elementos. En consecuencia, Archundia *et al.* dedujeron que al aumentar el ángulo de acartelamiento, la capacidad final de deformación, δ_{clps} , también aumenta. Este fenómeno se debe a la capacidad de las trabes acarteladas de aceptar un daño mayor al que admiten las trabes de sección constante y distribuirlo en las carteladas.

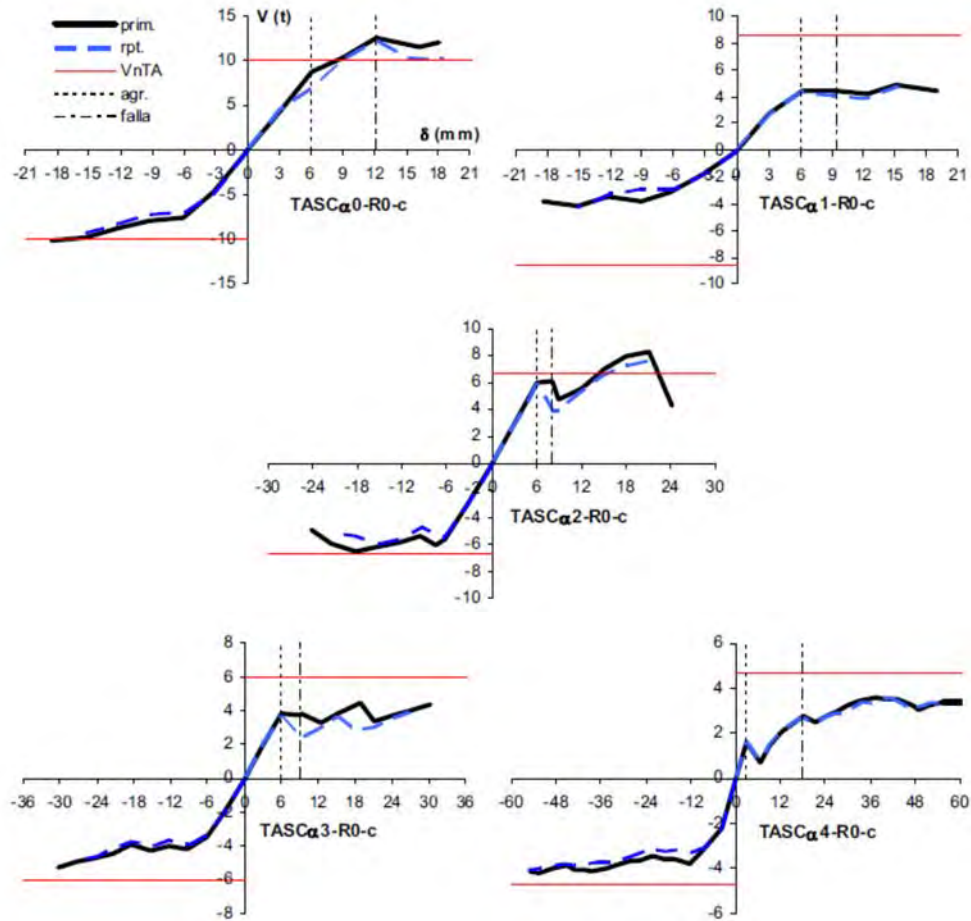


Figura 1.19 Envolventes de las curvas de histéresis (Archundia *et al.* 2007)

En la figura 1.20 se observa la comparación de la rigidez pico a pico normalizada por la rigidez inicial de los ciclos positivos, K_0 , la cual es la rigidez promedio de los ciclos de histéresis hasta el primer agrietamiento diagonal. La degradación de rigidez no fue considera al ocurrir el primer agrietamiento diagonal; de hecho, el elemento con tres grados de acartelamiento presentó una mayor degradación que el resto de los elementos.

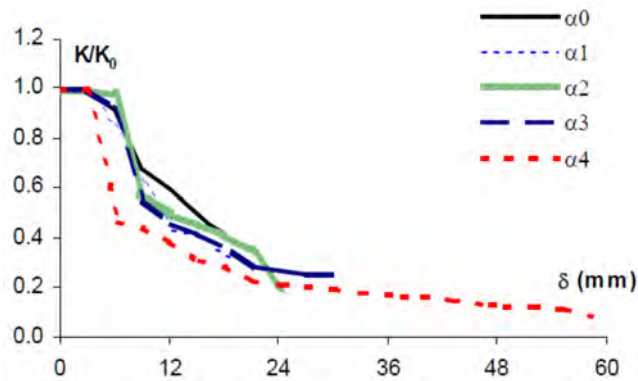


Figura 1.20 Rigidez pico a pico normalizada (Archundia *et al.* 2007)

La degradación de rigidez al momento de la falla tiende a incrementar con el aumento del acartelamiento, es notorio en dos casos: a) los ángulos de acartelamiento de cero a nueve la rigidez remanente es del orden del 60% de la inicial y, b) el elemento con doce grados de acartelamiento la degradación de rigidez es mayor, ya que solamente se conserva un 30% de las propiedades elásticas.

Los resultados experimentales muestran que al aumentar el ángulo de acartelamiento la rigidez de colapso disminuye. La rigidez observada en este estado puede ser hasta una quinta parte de la inicial. Estos valores son un claro indicativo de que las TACR pierden la mayor parte de sus propiedades iniciales toda vez que han disipado una cantidad nada despreciable de energía histerética. Por ende, una degradación tan excesiva en la rigidez elástica es un indicio de que los elementos ya no son reparables.

En la figura 1.21 se presenta la evolución de la rigidez para los ciclos primeros y los de repetición. Aunque se observa que ambas respuestas tienen igual tendencia, es notoria una degradación de la rigidez en los ciclos de repetición, principalmente a partir del primer agrietamiento diagonal. Este fenómeno los autores lo asociaron con el agrietamiento del concreto, el cual no tiene una plasticidad perfecta y pierde sus propiedades cuando este se presenta.

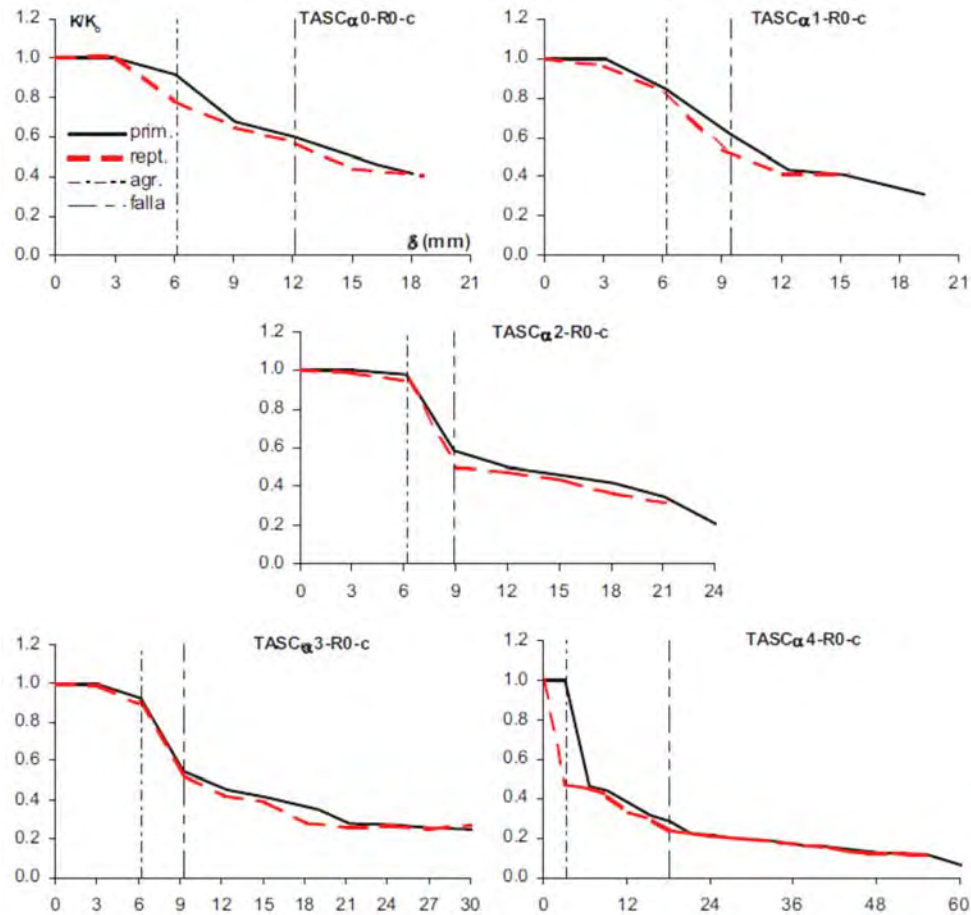


Figura 1.21 Efecto de la repetición de (Archundia *et al.* 2007)

La energía disipada en cada ciclo durante las pruebas experimentales de las TACR se presenta en la figura 1.22. Se observa que en las vigas de sección variable la energía en los ciclos primeros y de repetición es muy similar hasta la aparición del primer agrietamiento diagonal, también se observa que el elemento prismático presentó un menor consumo de energía en los ciclos de repetición antes del primer agrietamiento diagonal, lo cual coincide con lo observado en la rigidez del ciclo.

A la vez se observó que una vez ocurrido el primer agrietamiento diagonal y un poco antes de la falla, la tendencia es que la energía requerida para cumplir la demanda de desplazamiento es mayor en los ciclos primeros que en los ciclos de repetición. También se observó en los ensayos experimentales que durante los ciclos de repetición no se generaba más agrietamiento, sino solamente se ensanchaban las grietas ya formadas.

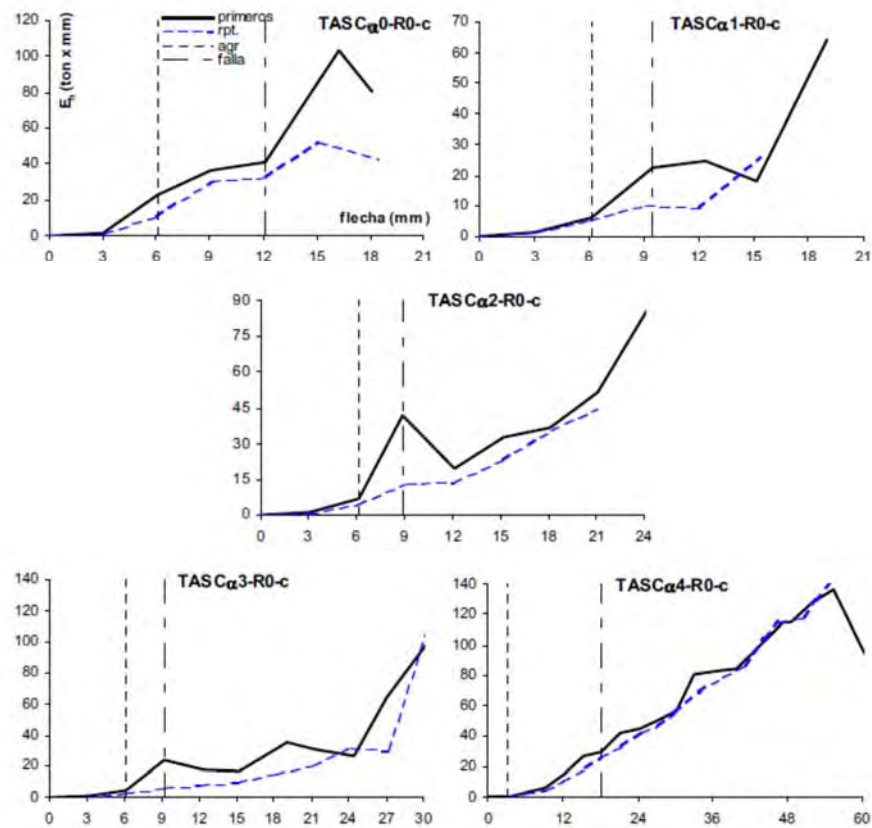


Figura 1.22 Energía histerética por ciclo, E_h , (Archundia *et al.* 2007)

En la figura 1.23 se muestra la energía histerética acumulada, como también se nota que en las trabes de sección variable requirieron mucho menos energía que la trabe prismática para presentar el primer agrietamiento diagonal.

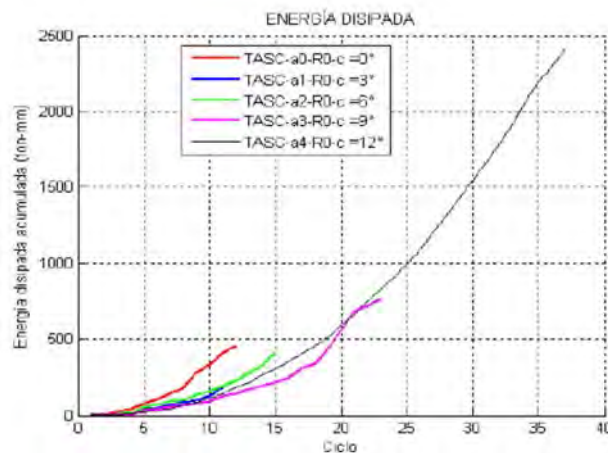


Figura 1.23 Energía histerética acumulada E_h , (Archundia *et al.* 2007)

Capítulo 2

Alcance del proyecto experimental

El objetivo principal del estudio experimental es determinar el mecanismo resistente de trabes acarteladas de concreto reforzado en condición de continuidad ante cargas cíclicas reversibles (empuje y jale).

Para cumplir con el objetivo, se analizaron los mecanismos de resistencia a cortante cíclico al cual estuvieron sujetas las trabes, en especial en las cartelas. Cabe mencionar que la principal variable a considerar en el comportamiento de trabes acarteladas de concreto en condición de continuidad es el ángulo de acartelamiento (α).

Se estudia experimentalmente la condición de continuidad, que afecta de manera importante la contribución del refuerzo longitudinal inclinado en comparación con los obtenidos en trabes acarteladas simplemente apoyadas, además, se estudia experimentalmente el aporte del refuerzo inclinado con refuerzo transversal, con lo observado y estudiado previamente de forma experimental en condiciones de apoyo simple (Tena-Colunga et al. 2007, Grande 2009).

Lo anterior se justifica tomando en cuenta la poca información experimental que se tiene, sobre el comportamiento a cortante en estos elementos, sometidos a carga estática monotónica (Debaiky y El-Niema 1982, El-Niema 1988, MacLeod y Houmsi 1994), y aún menos ante carga cíclica reversible (Grande 2005 y 2009, Archundia *et al.* 2007), así como la omisión de recomendaciones específicas en códigos de construcción para concreto reforzado (RCDF y ACI) para trabes acarteladas, como lo menciona Archundia *et al.* en 2002 (Grande 2009).

Para cumplir con el objetivo, se ensayaron cinco especímenes que constan de cinco geometrías distintas, con refuerzo por cortante en la zona de las cartelas. Los especímenes cubren de manera razonablemente uniforme en un intervalo de cero a diez grados de acartelamiento, α . La geometría y el arreglo del refuerzo longitudinal se eligieron con base en lo observado en la práctica mexicana y que consiste en tener el acero continuo a lo largo de la trabe y siguiendo la geometría de la misma (Tena-Colunga *et al.* 2001). Los cinco especímenes cuentan con refuerzo mínimo a cortante, acorde a la propuesta de las NTCC-04 para trabes de sección prismática, éste se determinó con base en el peralte del apoyo de las trabes (peralte mayor).

Todos los especímenes se sometieron a cargas cíclicas reversibles (empuje y jale) aplicadas en los extremos de los especímenes. Además, todos los especímenes fueron instrumentados internamente y externamente. La instrumentación interna consistió de entre 54 y 58 deformímetros eléctricos (strain gages) en cada espécimen, y tiene como función principal la de medir la deformación interna que sufre el acero transversal y

longitudinal ante la aplicación de las cargas cíclicas, y la contribución del acero transversal a la viga, entre otros. La instrumentación externa consistió en transductores de desplazamiento, micrómetros, deformímetros eléctricos (strain gages) de concreto y celdas de carga.

Las enseñanzas de este trabajo de investigación permitirán a mediano plazo aportar más recomendaciones de las que ya se tienen con ensayos previos, que garanticen el diseño dúctil de trabes acarteladas, al poder prevenir y mejorar con conocimiento las potenciales fallas de corte ante sollicitaciones cíclicas.

En los siguientes capítulos se describe detalladamente lo correspondiente a las diferentes etapas del programa experimental.

Capítulo 3

Criterios de diseño de los especímenes de prueba

3.1 Introducción

En el presente capítulo se presentan los criterios de diseño de las trabes acarteladas de concreto reforzado en condición de continuidad, como las trabes ensayadas experimentalmente por MacLeod y Houmsi (1994), para corroborar o descartar sus observaciones. Es por ello que todos los especímenes de prueba de este estudio se diseñaron para fallar a cortante en condiciones de carga última según las recomendaciones propuestas de Tena-Colunga *et al.* (2008).

La diferencia de una trabe acartelada simplemente apoyada con respecto a una continua, es en cuanto a la contribución del refuerzo inclinado y en función de la aplicación de la carga, lo anterior se ilustra esquemáticamente con el apoyo de las figuras 3.1 y 3.2. En la trabe acartelada continua se observa que el diagrama de momentos crece en el mismo sentido que la cartela y, por lo tanto, se suma la contribución del refuerzo inclinado en la resistencia de la cartela a cortante (figura 3.2). En contraste, en una trabe simplemente apoyada, el diagrama de momentos crece en sentido contrario al que crece la cartela, por lo tanto, se resta la contribución del refuerzo inclinado en la resistencia de la cartela a cortante. En el diagrama de cortante, se observa también que en una trabe acartelada continua o en voladizo, el cortante máximo y el momento máximo coinciden, lo que no sucede en la viga simplemente apoyada.

Con lo anterior, se propuso un armado longitudinal a las trabes acarteladas en doble voladizo que es continuo en ambos lechos, y se les proveyó de un refuerzo transversal en función del peralte de apoyo, como lo establecen las NTCC-04.

La geometría es función del ángulo de acartelamiento, por lo tanto, como se mencionó en el capítulo anterior, los especímenes cubren de manera razonablemente uniforme un intervalo de cero a diez grados de acartelamiento, α . Las trabes se construyeron de manera que la longitud de acartelamiento (L_c) tuviera un tercio del claro equivalente (L), como se ha considerado en ensayos previos experimentales (Archundia *et al.* 2005 y 2007).

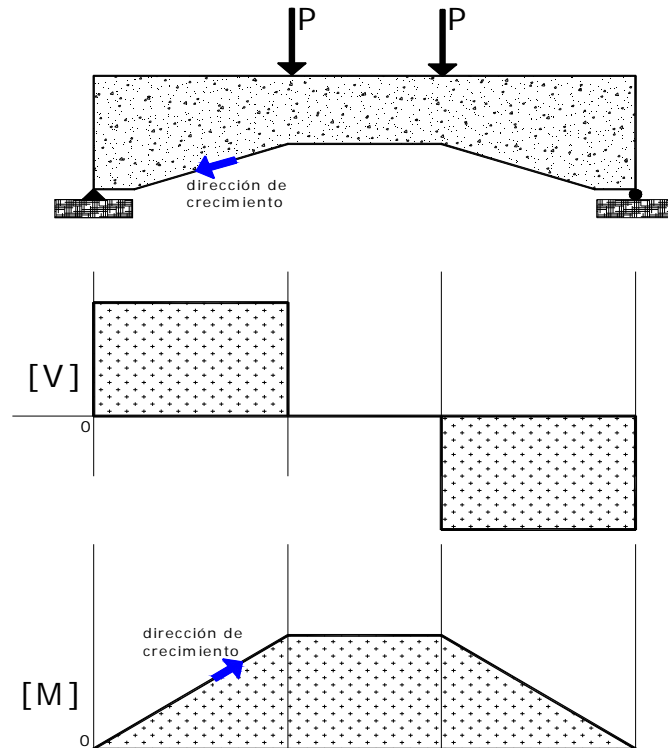


Figura 3.1. Esquema de viga acartelada simplemente apoyada y su diagrama de cortante y momento.

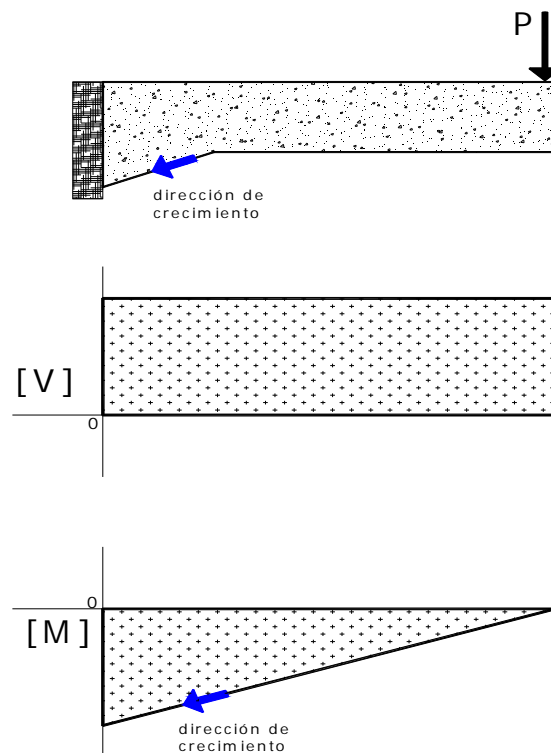


Figura 3.2. Trabe acartelada en voladizo y su diagrama de cortante y momento.

3.2 Geometría de los especímenes

El tamaño de las trabes acarteladas de concreto reforzado (TACR) se fijó con base en la capacidad de carga y maniobras del Laboratorio de Estructuras de la UAM – Azcapotzalco.

Los especímenes de prueba consideran un nudo típico interior de un marco en el último nivel, por lo que las secciones de trabes en estudio corren del nudo al centro del claro teórico. Por lo tanto, se tienen especímenes de prueba cuya longitud total es de 430 cm, con un claro equivalente a paños de columna (luz) de la crujía del marco (L) de 370 cm. El ancho $b = 25\text{cm}$ es constante para todas las TACR. El peralte total máximo, que corresponde al nudo viga-columna es siempre $h_{max} = 45\text{ cm}$, y el peralte mínimo h_{min} , que corresponde a la sección prismática de la trabe, varía entre 45 cm (trabe prismática, $\alpha=0^\circ$) y 23 cm ($\alpha=10.43^\circ$).

La columna de concreto reforzado del marco tiene una sección transversal rectangular de 60 cm x 45 cm. La longitud de las columnas varía de acuerdo al grado de acartelamiento, y esto se hizo en función de la carrera de los gatos hidráulicos a emplear en los ensayos, con la finalidad de tener suficiente capacidad para empujar y jalar a los especímenes. La columna está anclada a un dado o muerto de concreto, que a su vez estará sujeto al piso de reacción.

En la figura 3.3 se muestra un croquis esquemático de las dimensiones de las trabes acarteladas en doble voladizo utilizadas en este trabajo.

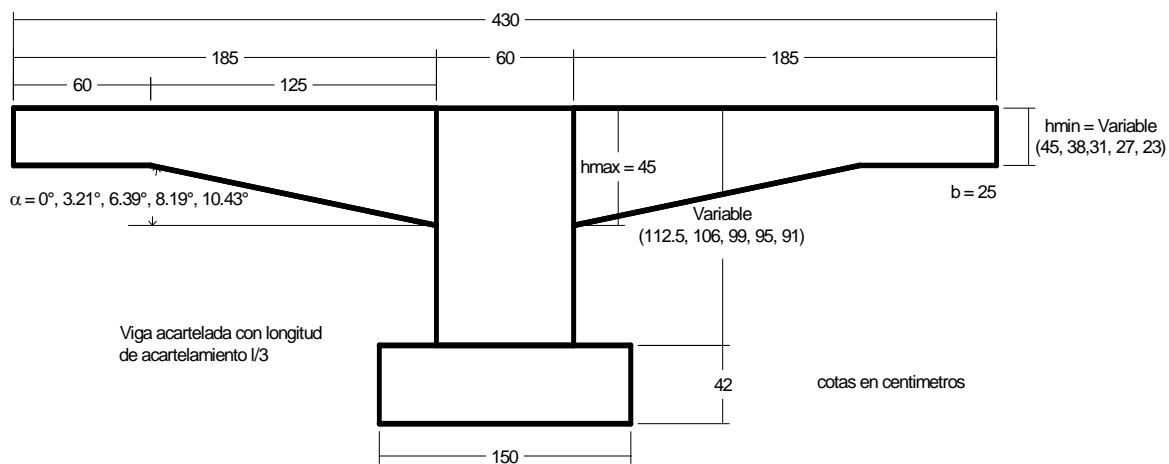


Figura 3.3. Dimensiones generales de los especímenes de prueba

El muerto se sujeto al piso de reacción mediante 12 anclas (Cold Roll) de una pulgada de diámetro, 12 tubos conduit galvanizado de pared delgada de 1 ¼" ahogados en el dado de concreto, una placa base de acero de ½" de espesor con medidas de 180cm x 80cm y dos

placas de acero de $\frac{1}{2}$ " de espesor de 10cm x 150cm, este anclaje se realizó con la finalidad de distribuir el esfuerzo entre el cold roll, el piso de reacción y el dado de concreto, como se muestra en la figura 3.4. Además, esta forma de anclaje fue para que los especímenes, al ser sometidos a las cargas de empuje y jale, no presentaran volteo y el aplastamiento en la parte del anclaje.



Figura 3.4. Anclaje del espécimen al piso de reacción

3.3 Condición de carga para los especímenes

Las traveses acortados se ensayaron en condición de continuidad y las cargas cíclicas se aplicaron a 30 cm de los extremos de la trabe como se muestra en la figura 3.5. Las cargas aplicadas sobre placas de acero de 2.54x10x25 cm; además con la finalidad de uniformizar la fuerza aplicada sobre la superficie de contacto, se colocó una hoja de neopreno de 0.3 cm de espesor entre las placas y el elemento. Este arreglo de cargas se derivan y adaptan de los ensayos estáticos y cíclicos reportados por Archundia (2004), Archundia *et al.* (2005), Tena-Colunga *et al.* (2008) y Grande (2009).

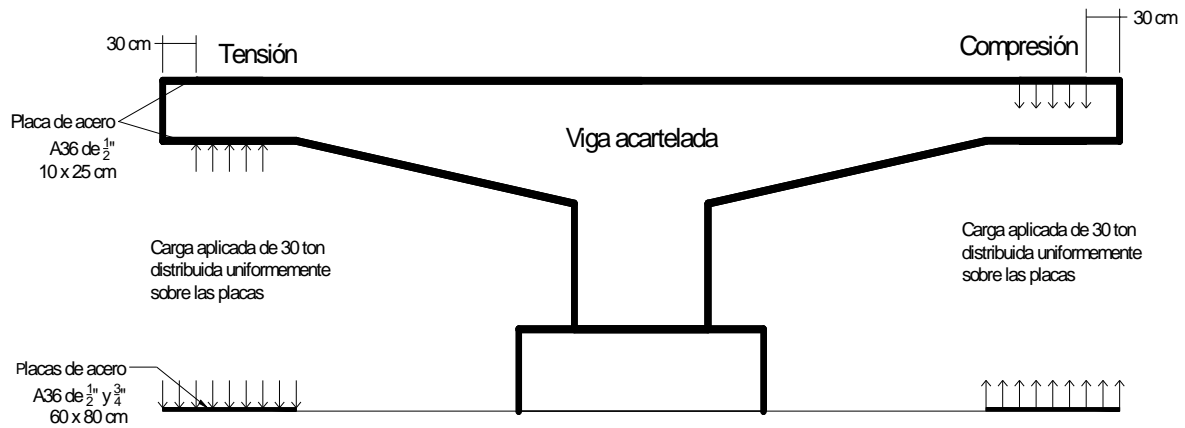


Figura 3.5. Esquema de aplicación de cargas

3.4 Identificación de los especímenes

Para la identificación de cada una de la traves acarteladas, se siguió la nomenclatura de ensayos experimentales previos por Archundia (2004), Archundia *et al.* (2005), Tena-Colunga *et al.* (2008) y Grande (2009), como también la propuesta por López en 2011, que dicho trabajo es el diseño de las traves acarteladas en condición de continuidad.

La nomenclatura o criptograma utilizado permite identificar a los elementos según su refuerzo transversal, refuerzo longitudinal, ángulo de acartelamiento y tipo de carga aplicada.

Como lo menciona López en 2011 el criptograma está formado por ocho literales, de los cuales los que están en negritas son constantes, mientras que los que están en negritas y cursivas son variables. El significado del criptograma es el siguiente:

Los primeros caracteres de la primer literal (**TA**), indican que se trata de trabes acarteladas. La segunda literal indica el tipo de falla que se espera en el elemento, **S** significa una falla por cortante (del inglés *shear*), asimismo, para la segunda literal se tiene como opción la letra **F**, que indicaría falla a flexión (*flexure* en inglés).

La tercer literal identifica el arreglo del refuerzo longitudinal, la opción **C** se refiere al arreglo continuo (único utilizado en este trabajo), también se tiene la opción de **T**, que se refiere a un arreglo con traslape tipo tijera.

La cuarta literal, (**V**), indica que esta en doble voladizo y la quinta, (**3**), indica la longitud de acartelamiento utilizada: $3 = L/3$ y $5 = L/5$, que para este trabajo de investigación se utilizó $L/3$.

Los caracteres de la sexta literal, (**αi**), indican que se trata de un indicador-contador de los diferentes ángulos de acartelamiento, α , utilizados en este trabajo experimental. El contador (**i**) adopta los valores siguientes: **0** para un ángulo $\alpha=0^\circ$ (trabe prismática), **1** para $\alpha=3.21^\circ$, **2** para $\alpha=6.39^\circ$, **3** para $\alpha=8.19^\circ$ y **4** para $\alpha=10.43^\circ$

Los caracteres de la séptima literal (**Rj**) también funcionan como un indicador-contador, pero en este caso es para el tipo de refuerzo transversal para resistir cortante, **R**. El contador (**j**) adopta los valores siguientes: **0** para los elementos sin refuerzo transversal y **1** para los elementos que contienen un refuerzo transversal mínimo por cortante según la propuesta para las NTCC-04.

La octava literal, identifica el tipo de carga a aplicar, **c** significa carga cíclica.

En la figura 3.6 se observa y resume el significado de cada literal para la identificación de las trabes acarteladas de concreto reforzado para este trabajo de investigación.

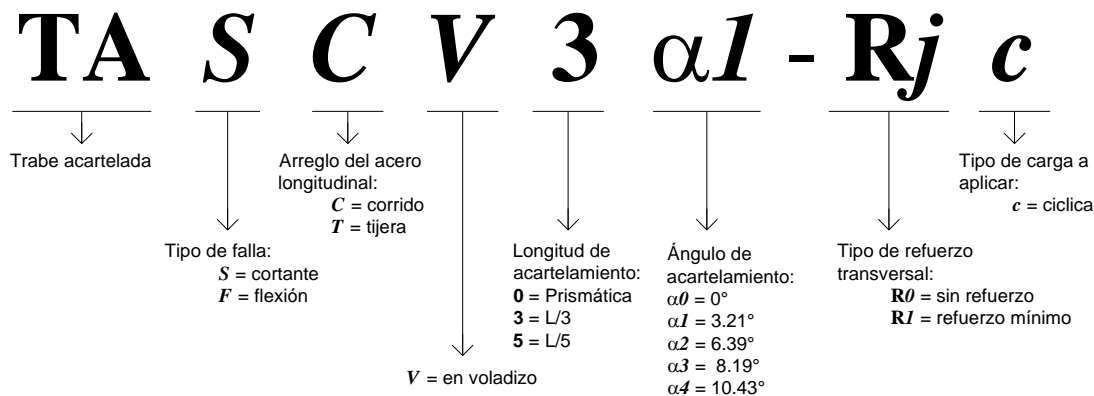


Figura 3.6. Criptograma utilizado para la identificación de los especímenes

Cabe recordar que en este proyecto experimental se ensayaron cinco especímenes con refuerzo transversal, los cuales ahora se identifican fácilmente. En la tabla 3.1 se enlista las trabes acarteladas de concreto reforzado con y sin refuerzo transversal.

Tabla 3.1 Geometría de las trabes acarteladas utilizadas en este estudio

Trabe	α	L (cm)	b (cm)	h_{\max} (cm)	h_{\min} (cm)	h_{\max}/h_{\min}
TASCV0 $\alpha 0$ -R0c	0°	370	25	45	45	1.0000
TASCV3 $\alpha 1$ -R0c	3.21°	370	25	45	38	1.1842
TASCV3 $\alpha 2$ -R0c	6.39°	370	25	45	31	1.4516
TASCV3 $\alpha 3$ -R0c	8.19°	370	25	45	27	1.6667
TASCV3 $\alpha 4$ -R0c	10.43°	370	25	45	23	1.9565
TASCV0 $\alpha 0$ -R1c	0°	370	25	45	45	1.0000
TASCV3 $\alpha 1$ -R1c	3.21°	370	25	45	38	1.1842
TASCV3 $\alpha 2$ -R1c	6.39°	370	25	45	31	1.4516
TASCV3 $\alpha 3$ -R1c	8.19°	370	25	45	27	1.6667
TASCV3 $\alpha 4$ -R1c	10.43°	370	25	45	23	1.9565

3.5 Armados de los especímenes de prueba

Las trabes acarteladas de concreto reforzado se diseñaron para fallar a cortante según las recomendaciones propuestas por Tena-Colunga *et al.* (2008). Las especificaciones de diseño consideraron concreto con un esfuerzo nominal a la compresión $f'_c = 250 \text{ kg/cm}^2$ y acero de refuerzo con esfuerzo nominal de fluencia $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$. Los armados longitudinales de todos los especímenes fue continuo en toda su longitud siguiendo la geometría de las vigas; de esta manera, el acero del lecho superior fue de 3#12 ($A'_s = 34.20 \text{ cm}^2$) y el acero del lecho inferior de 2#12 ($A_s = 22.80 \text{ cm}^2$). A las trabes con

refuerzo transversal se le proveyó un refuerzo mínimo en función del peralte de apoyo, que consistió en estribos de dos ramas del # 3 ($A_v = 1.425 \text{ cm}^2$) a una separación de 25 cm (E#3@25), en el claro de cortante. En las vigas sin refuerzo transversal, solo se utilizarán seis estribos del # 3 para sujetar las barras longitudinales.

Asimismo, en los vértices se proveyó un refuerzo transversal para resistir la componente vertical que se produce por el cambio de dirección del acero longitudinal inferior. Como se observa en la figura 3.7, donde la componente vertical (F_{vert}) que produce el cambio de dirección de acero longitudinal está dado por:

$$F_{vert} = A_s f_y \text{sen} \alpha = T_y \text{sen} \alpha \quad 3.1$$

Donde $T_y \text{sen} \alpha$ es la tensión del acero longitudinal en la fluencia, A_s es el área de acero longitudinal y α es el ángulo de inclinación de la cartela con respecto a un eje horizontal.

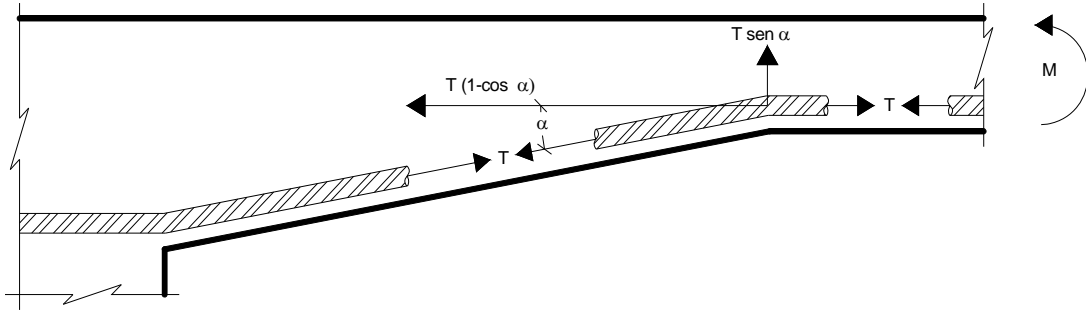


Figura 3.7. Fuerzas inclinadas por el cambio de dirección de refuerzo horizontal (adaptada de Archundia *et al.* 2005)

La separación del refuerzo transversal por cambio de dirección en el acero longitudinal, S_{cd} , requerida para el refuerzo en esta zona, como se visualiza en la figura 3.8, se obtiene de la ecuación 3.2 propuesta por Archundia *et al.* 2005:

$$S_{cd} = \frac{A_v f_y d_{min}}{F_{vert}} \quad 3.2$$

donde d_{min} es el peralte efectivo en la zona prismática de la viga, A_v es la suma de las áreas de las ramas de los estribos y f_y es el refuerzo de fluencia del acero del refuerzo transversal.

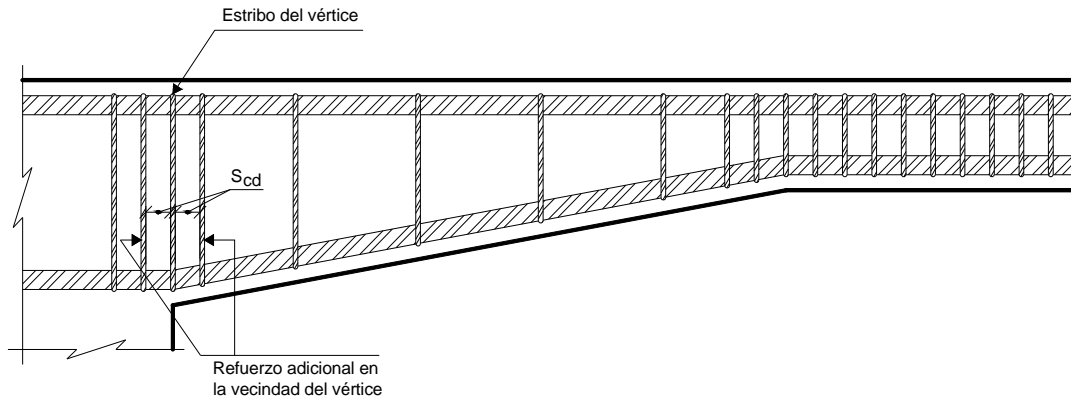


Figura 3.8. Refuerzo transversal en los vértices de la trabes (López 2011)

El diseño de la columna se realizó conforme lo establecen las Normas Técnicas Complementarias de Estructuras de Concreto de 2004; sus dimensiones son de 60 x 40cm. El acero longitudinal de los especímenes que se ensayaron fue el mismo para todos los elementos y fue continuó en toda su longitud, siguiendo la geometría de las columnas; asimismo, el acero del lecho superior fue de 2#12 ($A_s=22.8\text{cm}^2$), el acero de lecho intermedio fue de 2#12 ($A_s=22.8\text{cm}^2$) y el acero del lecho superior fue de 2#12 ($A_s=22.8\text{cm}^2$). Para dar restricción a las barras superiores e inferiores, se colocaron estribos del #3, y para las barras intermedias se colocaron grapas del #3. En la figura 3.9 se muestra la sección transversal de la columna para todos los especímenes.

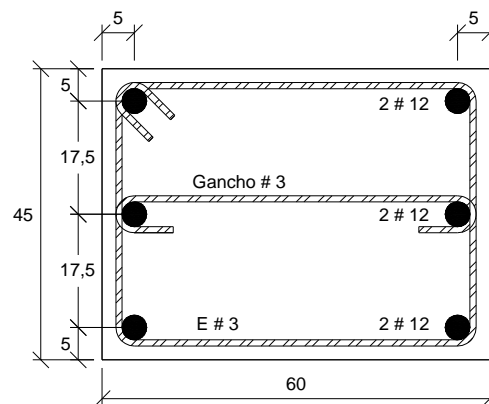


Figura 3.9. Sección transversal típica de la columna (López 2011)

La unión viga-columna se diseño según lo establecido en las Normas Técnicas Complementarias de Estructuras de Concreto de 2004, en su sección Resistencia a

cortante en uniones viga-columna, donde se verificó que el cortante nominal, (V_n), del nodo de la TACR cumpliera con lo establecido con la norma, a la vez se comprobó y cumplió que los cortantes obtenidos sobrepasan lo solicitado ($V_n \geq V_{cr}$).

En la figura 3.10 se muestra el detalle de la unión viga-columna de la traves acarteladas de concreto reforzado.

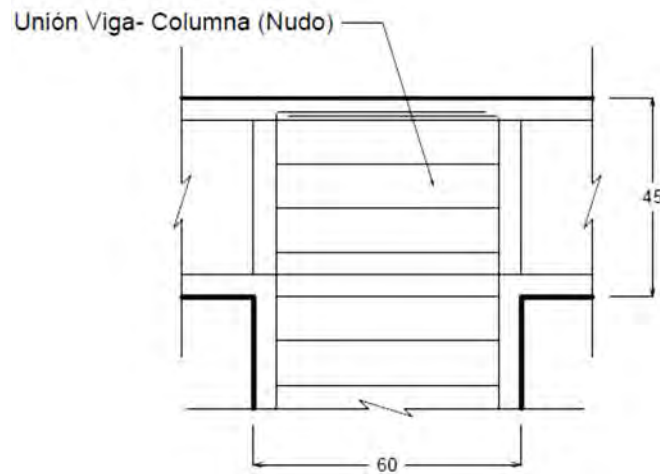


Figura 3.10. Detalle de nudo viga-columna (López 2011)

El diseño del dado se realizó para que los especímenes al ser sometidos a las cargas de empuje y jale, no presentaran volteo y el aplastamiento en la parte del anclaje, sus dimensiones son de 150cm de largo x 80cm de ancho y 40cm de peralte.

El acero provisto al dado de anclaje fue de 5#4 ($A_s=6.35\text{cm}^2$) @ 15cm en la dimensión longitudinal y en la dimensión transversal de 10#4 ($A_s=12.7\text{cm}^2$) @ 12.4, en la figura 3.11 se visualiza el armado del dado de anclaje.

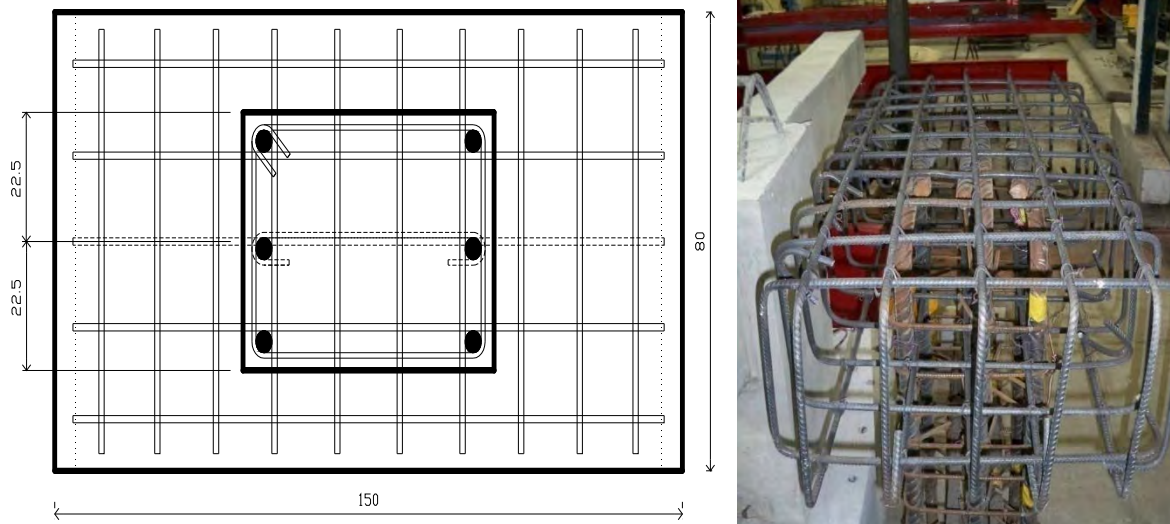


Figura 3.11. Esquema del armado del dado de anclaje

En la tabla 3.2 se presenta un resumen de los armados. Además en las figuras 3.12 a 3.21 se muestran los croquis de los armados con y sin refuerzo transversal para los especímenes ensayados.

Tabla 3.2 Armado de los especímenes de prueba

Tabla 3.2 Armado de los especímenes de prueba											
Trabe	α	Viga Acartelada						Nudo	Columna	Dado	
		Refuerzo Longitudinal		Refuerzo por Cortante						Exterior	Interior
		Superior	Inferior	Extremos	Cartelas	Vértice	Paño-Viga Columna				
TASCV0 α 0-R0c	0°	3#12	2#12	9E#3@6cm 5E#3@10cm	1E#3(armado)	-	-	3E#3@10cm	10E#3@10cm	5#4 @15cm	10E#4@12.4cm
TASCV3 α 1-R0c	3.21°	3#12	2#12	9E#3@6 cm	1E#3(armado)	-	-	5E#3@7cm	9E#3@10cm	5#4 @15cm	10E#4@12.4cm
TASCV3 α 2-R0c	6.39°	3#12	2#12	9E#3@6 cm	1E#3(armado)	-	2E#3@12.5cm	4E#3@7cm	10E#3@10cm	5#4 @15cm	10E#4@12.4cm
TASCV3 α 3-R0c	8.19°	3#12	2#12	9E#3@6 cm	1E#3(armado)	-	2E#3@10cm	4E#3@7cm	9E#3@10cm	5#4 @15cm	10E#4@12.4cm
TASCV3 α 4-R0c	10.43°	3#12	2#12	9E#3@6 cm	1E#3(armado)	-	4#3@6cm	4E#3@7cm	9E#3@10cm	5#4 @15cm	10E#4@12.4cm
TASCV0 α 0-R1c	0°	3#12	2#12	9E#3@6 cm 5E#3@10cm	4E#3 @ 25 cm	-	-	3E#3@10cm	10E#3@10cm	5#4 @15cm	10E#4@12.4cm
TASCV3 α 1-R1c	3.21°	3#12	2#12	9E#3@6 cm	6E#3 @ 25 cm	-	-	5E#3@7cm	9E#3@10cm	5#4 @15cm	10E#4@12.4cm
TASCV3 α 2-R1c	6.39°	3#12	2#12	9E#3@6 cm	6E#3 @ 25 cm	2E#3@12.5cm	2E#3@12.5cm	4E#3@7cm	10E#3@10cm	5#4 @15cm	10E#4@12.4cm
TASCV3 α 3-R1c	8.19°	3#12	2#12	9E#3@6 cm	6E#3 @ 25 cm	2E#3@10cm	2E#3@10cm	4E#3@7cm	9E#3@10cm	5#4 @15cm	10E#4@12.4cm
TASCV3 α 4-R1c	10.43°	3#12	2#12	9E#3@6 cm	6E#3 @ 25 cm	4#3@6cm	4#3@6cm	4E#3@7cm	9E#3@10cm	5#4 @15cm	10E#4@12.4cm

Croquis de los armados con refuerzo a cortante (cotas en cm)

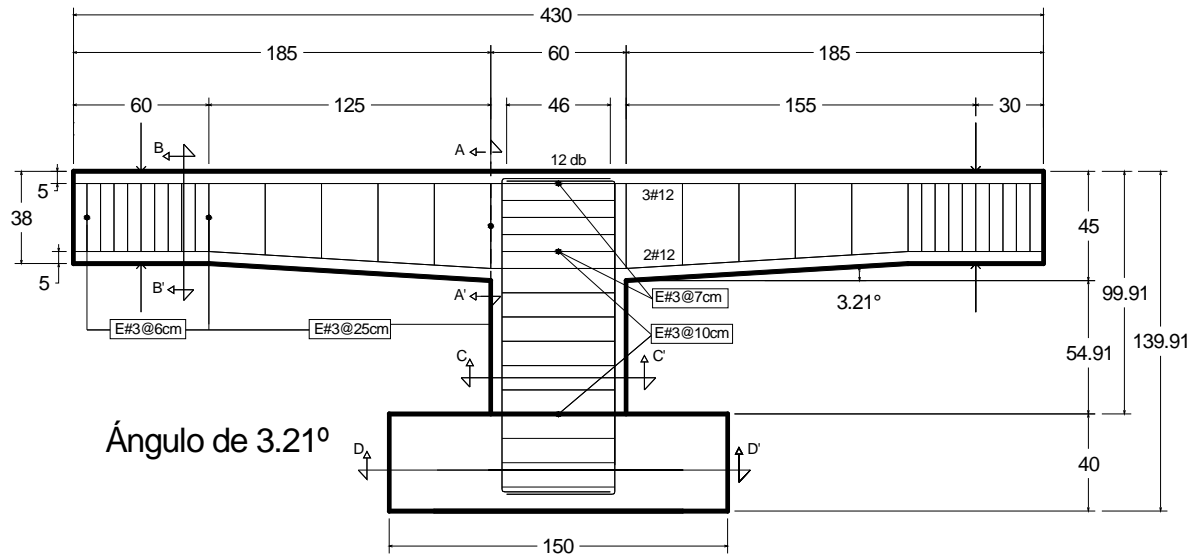


Figura 3. 12. TASCV3α1-R1c

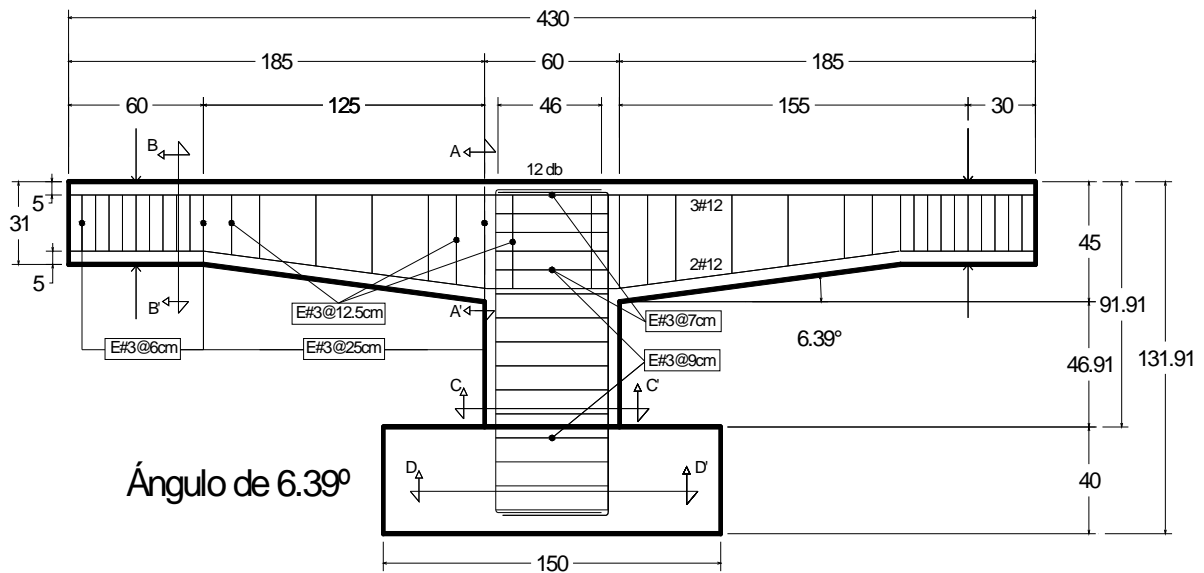


Figura 3. 13. TASCV3α2-R1c

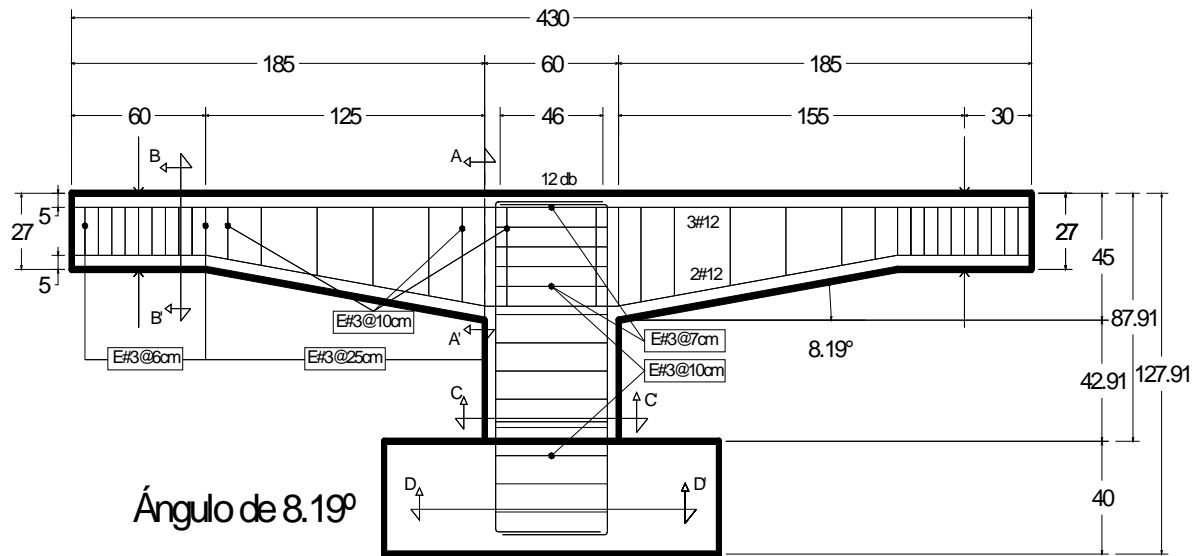


Figura 3.14. TASCV3α3-R1c

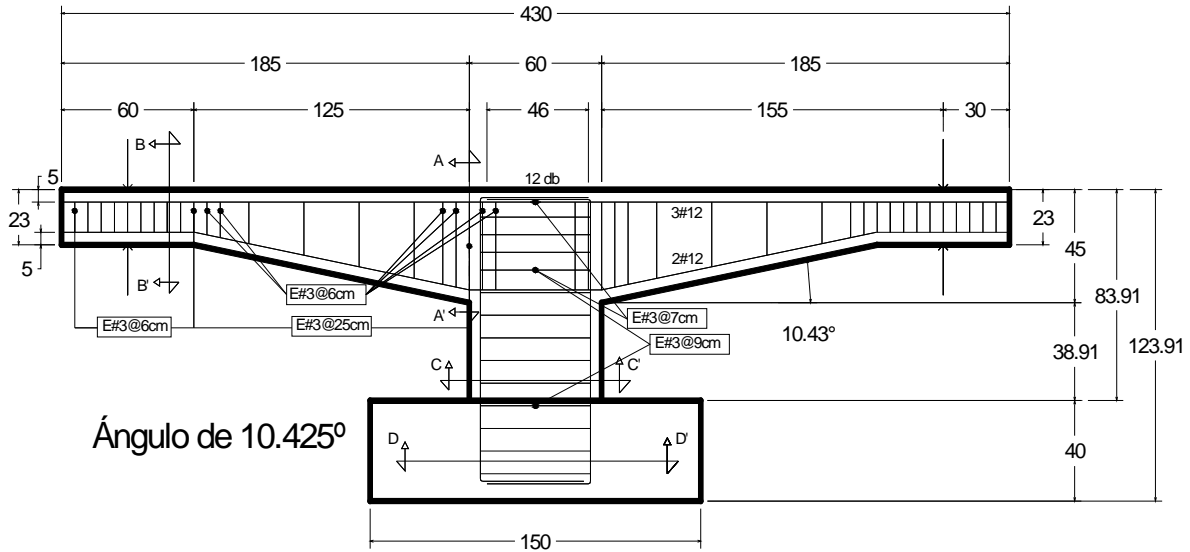


Figura 3.15. TASCV3α4-R1c

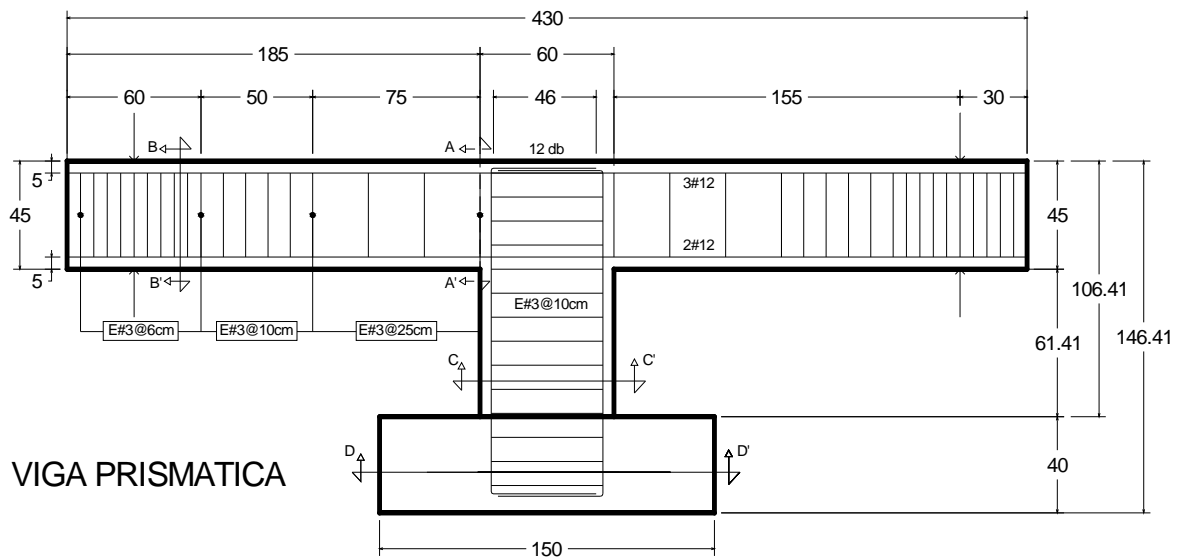


Figura 3.16. TASCV3α0-R1c

Croquis de los armados sin refuerzo a cortante (cotas en cm)

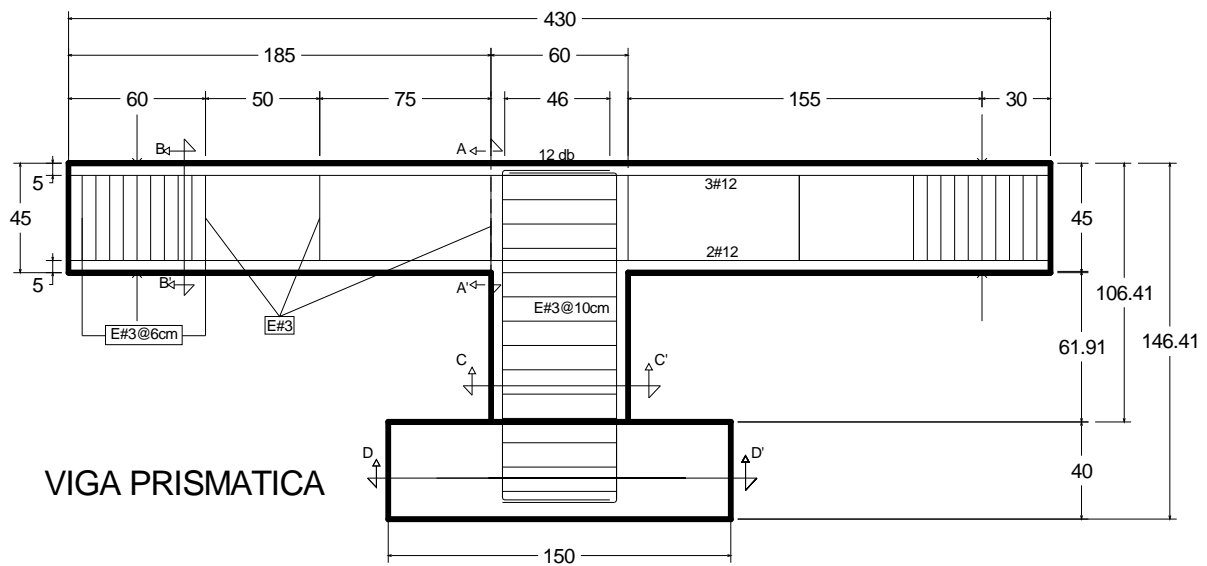


Figura 3.17. TASCV3α0-R0c

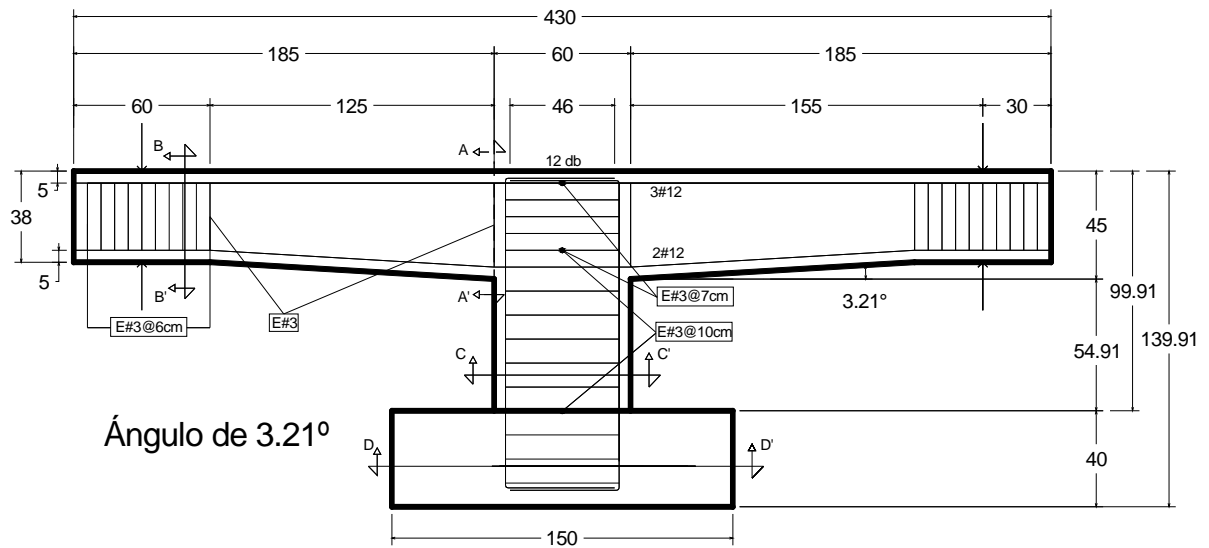


Figura 3.18. TASCV3α1-R0c

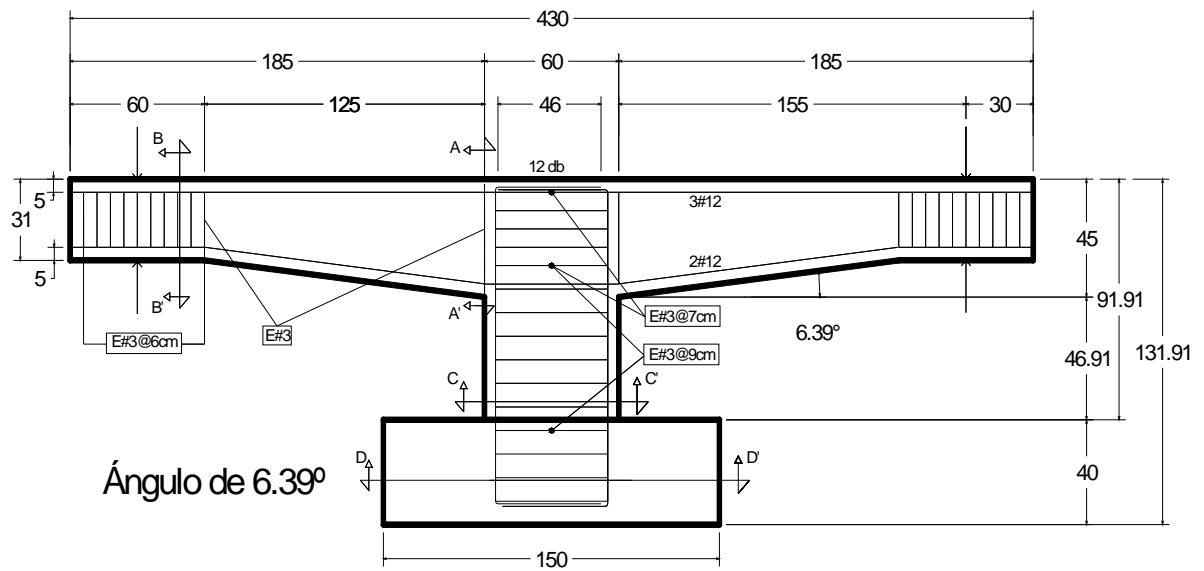


Figura 3.19. TASCV3α2-R0c

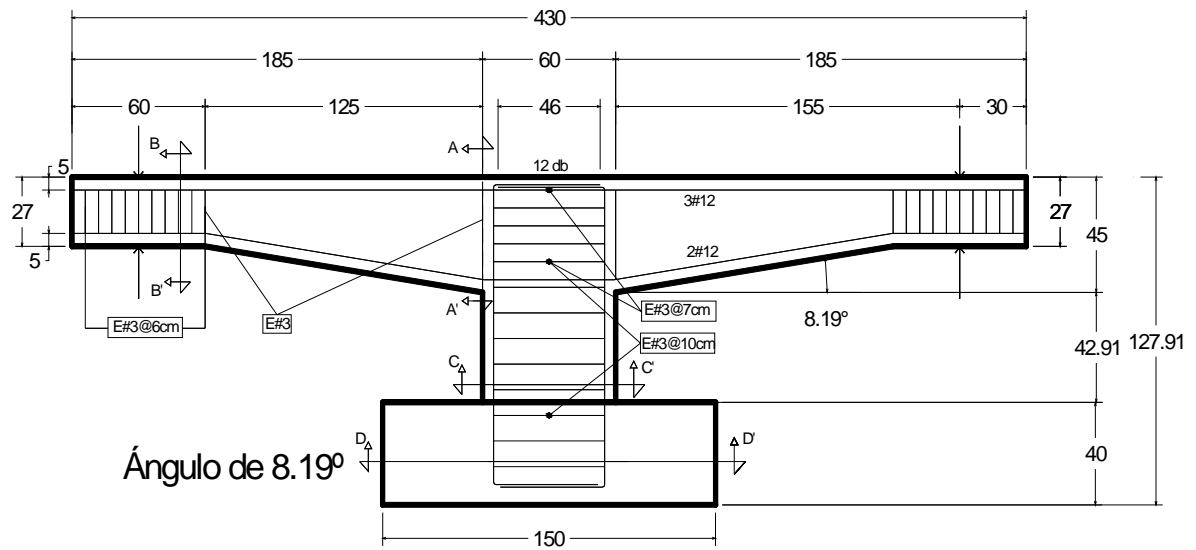


Figura 3.20. TASCV3α3-R0c

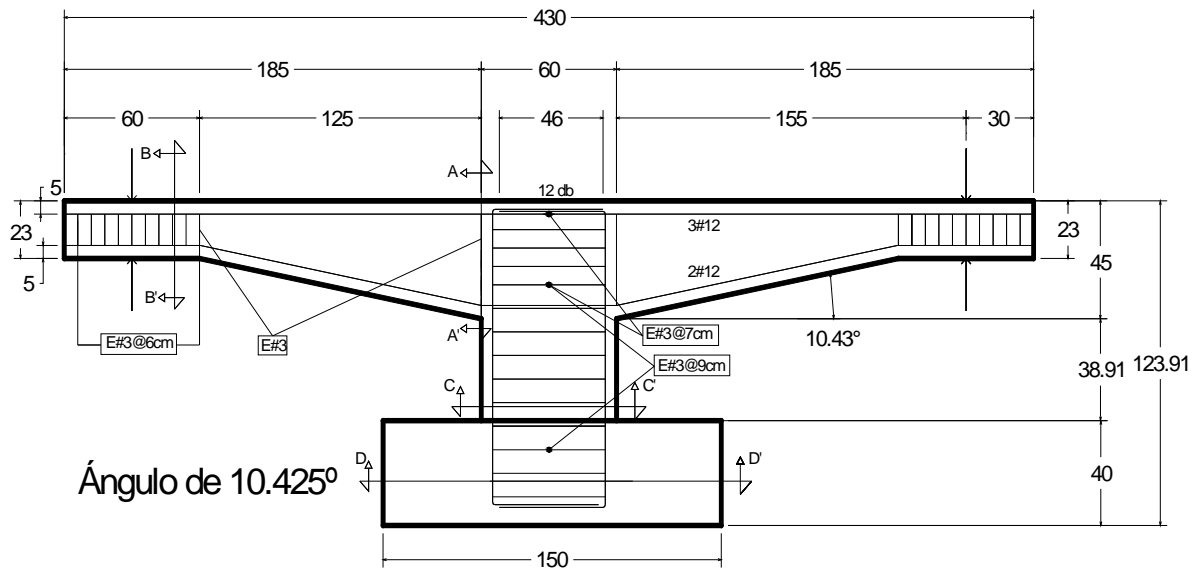


Figura 3.21. TASCV3α4-R0c

3.6 Diseño de los especímenes para obtener falla a cortante

La filosofía del diseño de las vigas acarteladas de prueba es que la falla se ocasione por el efecto de la fuerza cortante, como se comprobó en ensayos experimentales previos en vigas acarteladas simplemente apoyadas por Archundia *et al.* (2005) y Grande (2009). Por lo tanto, la flexión no debe ser un factor que influya en la falla ante carga última de la trabes acarteladas en condición de continuidad. Considerando las dimensiones y armados utilizados para los especímenes sujetos a carga cíclica, fue necesario evaluar las resistencias nominales a cortante de los modelos empleados; elementos con refuerzo mínimo a cortante (elementos R1c), o que carecieran de dicho refuerzo (elementos R0c). Una vez determinadas las capacidades nominales a cortante, se proveyó a los elementos la cuantía longitudinal necesaria, con la cual debería garantizar que no fallen a flexión dichos elementos. El cálculo de las resistencias nominales se realizó de acuerdo a la fórmula propuesta por Tena *et al.* (2008).

La resistencia nominal del concreto que se utilizó con fines diseño fue a los 28 días con f'_c de 250 kg/cm² y el esfuerzo nominal de fluencia del acero transversal y longitudinal f_y de 4200 kg/cm². El cemento utilizado fue el que se encuentra comúnmente en el mercado. El tamaño nominal del agregado grueso se especificó entre los 15 y 19 mm debido al área de acero longitudinal que se proveyó a la trabes acarteladas. Por cada espécimen, se obtuvieron siete cilindros de control, para verificar la resistencia real de concreto a los 28 días y el día del ensaye de cada uno además de dos viguetas de control.

3.6.1 Resistencia a cortante

La resistencia al corte se determinó con la fórmula propuesta por Tena-Colunga *et al.* (2008), y tomando las consideraciones que dicta las NTCC-04, para la obtención del cortante se consideró la contribución del concreto, V_{pc} , la contribución del refuerzo inclinado, V_{ri} , y la contribución del acero longitudinal, V_s , y está dada por la ecuación 3.3:

$$V_n = V_{pc} + V_{ri} + V_s \quad 3.3$$

donde V_{pc} se calculó con la ecuación 3.4

$$V_{pc} = \left(0.5f'_c + 176\rho_w \frac{V_n d_{cr}}{M_n} \right) b d_{cr} \quad 3.4$$

donde el ancho de la sección transversal, b , es constante para todos los especímenes ($b = 25$ cm), f'_c es la resistencia nominal a compresión del concreto ($f'_c = 250$ kg/cm²), ρ_w , es la cuantía de refuerzo longitudinal, V_n y M_n , son respectivamente el cortante nominal y momento nominal aplicados a la sección crítica y d_{cr} es el peralte crítico por cortante en las cartelas y se calcula de la siguiente forma:

$$d_{cr} = d_{min} [1 + 1.35 \tan \alpha] \leq \left[\left(\frac{h_{max} h_{min} - h_{max}^2}{2l_h} + h_{max} \right) - r \right] \quad 3.5$$

donde d_{min} es el peralte efectivo menor en las cartelas, $h_{m\acute{a}x}$ y $h_{m\acute{i}n}$ es el peralte total máximo y mínimo en las cartelas, l_h es la longitud de acartelamiento y r es el recubrimiento del concreto para el refuerzo longitudinal.

Para calcular la contribución del acero de refuerzo longitudinal en la resistencia a la fuerza cortante, V_s , se utilizó la ecuación 3.6, donde A_v es la suma de las áreas de las ramas de los estribos, separados una distancia, s . El peralte, d_{cr} , toma los mismos valores que los utilizados en el cculo de V_{pc} , y f_{yv} es el esfuerzo de fluencia del acero del refuerzo transversal.

$$V_s = \frac{A_v f_{yv} d_{cr}}{s \tan(45 - \alpha)} \quad 3.6$$

El valor de α se refiere al ángulo de acartelamiento de las trabes, como se muestra en la tabla 3.1. En la figura 3.22 se muestran las secciones utilizadas para el cculo de cortante de los especímenes.

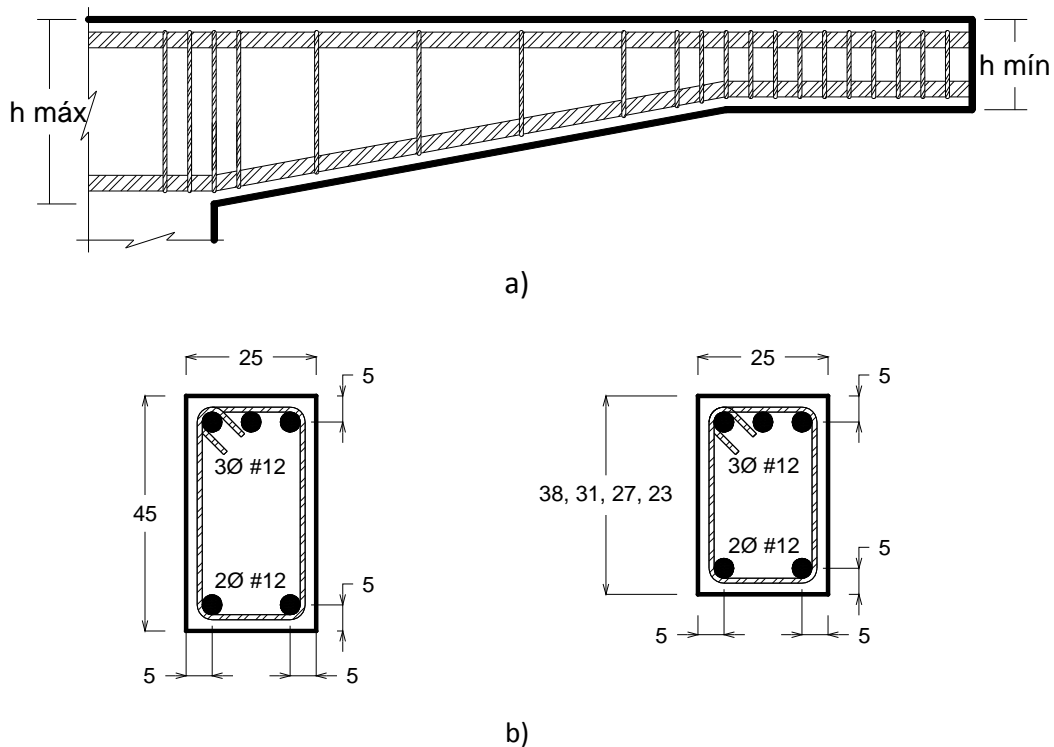


Figura 3.22 Secciones tpicas para el cculo de cortante: a) ubicación de peraltes y, b) peralte máximo y peralte mínimo

Para el cálculo de la contribución del refuerzo inclinado, V_{ri} , se utilizó la ecuación 3.7, donde el peralte, d_{cr} , se definió previamente en la ecuación 3.4.

$$V_{ri} = \pm \frac{M_{cr}}{d_{cr}} \tan \alpha \quad 3.7$$

donde M_n fue definido en la ecuación 3.4, M_{cr} , que se refiere al momento crítico aplicado en d_{cr} , y que se calcula con las ecuaciones 3.8 ó 3.9, en las cuales en una se considera el 50 y en la otra 85 por ciento del valor del momento nominal respectivamente.

$$M_{cr} = 0.5M_n(1 - 1.6\tan\alpha) \quad 3.8$$

$$M_{cr} = 0.85M_n(1 - 1.6\tan\alpha) \quad 3.9$$

En las tablas 3.3 y 3.4 se reporta el cortante obtenido para momento negativo y en las tablas 3.5 y 3.6 el cortante obtenido para momento positivo; además, se enlistan los diferentes especímenes y sus resistencias respectivas calculadas con las ecuaciones 3.3 a 3.7, donde se aprecia que el cortante proporcionado por el refuerzo inclinado, V_{ri} , aumenta conforme se incrementa el ángulo de acartelamiento, α . También se observa que considerando un 85 por ciento del momento nominal positivo o negativo, el valor de V_{ri} es mayor que V_s para el ángulo de acartelamiento mayor. Esto se observa más directamente en las figuras 3.23 a 3.26.

Tabla 3.3 Resistencia nominal a cortante 0.85 M_n				
Trabe	V_{pc} (ton)	V_{ri} (ton)	V_s (ton)	$V_n = V_{pc} + V_{ri} + V_s$
0°	9.60	0.00	10.47	20.07
3.21°	8.87	5.47	10.40	24.74
6.39°	7.82	9.53	9.81	27.16
8.19°	7.08	11.13	9.19	27.40
10.43°	6.32	12.47	8.53	27.33

Tabla 3.4 Resistencia nominal a cortante 0.5 M_n				
Trabe	V_{pc} (ton)	V_{ri} (ton)	V_s (ton)	$V_n = V_{pc} + V_{ri} + V_s$
0°	9.60	0.00	10.47	20.07
3.21°	8.75	3.22	10.40	22.37
6.39°	7.62	5.60	9.81	23.03
8.19°	6.84	6.55	9.19	22.57
10.43°	6.03	7.34	8.53	21.90

Tabla 3.5 Resistencia nominal a cortante $0.85 M_n^+$				
Trabe	V_{pc} (ton)	V_{ri} (ton)	V_s (ton)	$V_n = V_{pc} + V_{ri} + V_s$
0°	9.57	0.00	10.47	20.04
3.21°	8.74	3.77	10.40	22.91
6.39°	7.62	6.61	9.81	24.04
8.19°	6.85	7.77	9.19	23.81
10.43°	6.04	8.80	8.53	23.37

Tabla 3.6 Resistencia nominal a cortante $0.5 M_n^+$				
Trabe	V_{pc} (ton)	V_{ri} (ton)	V_s (ton)	$V_n = V_{pc} + V_{ri} + V_s$
0°	9.57	0.00	10.47	20.04
3.21°	8.67	2.22	10.40	21.28
6.39°	7.49	3.89	9.81	21.18
8.19°	6.68	4.57	9.19	20.44
10.43°	5.85	5.17	8.53	19.56

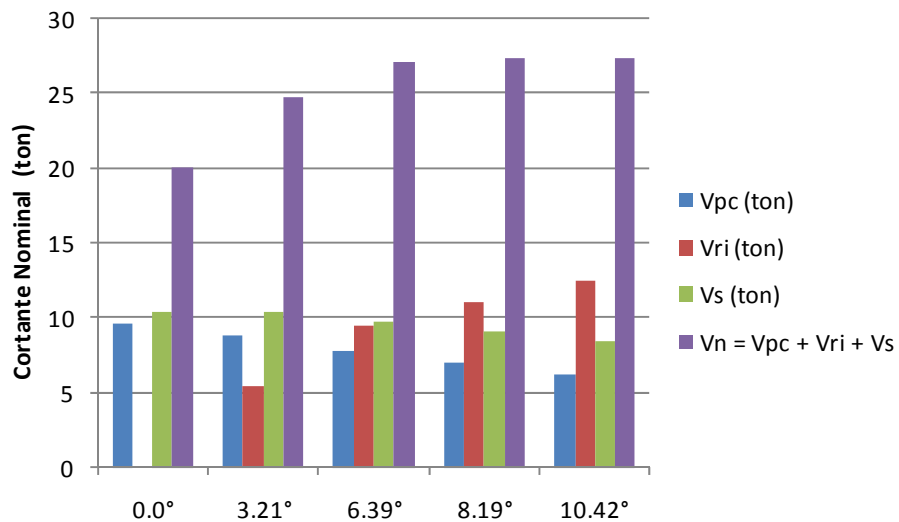


Figura 3.23 Resistencia nominal a cortante $0.85 M_n^+$

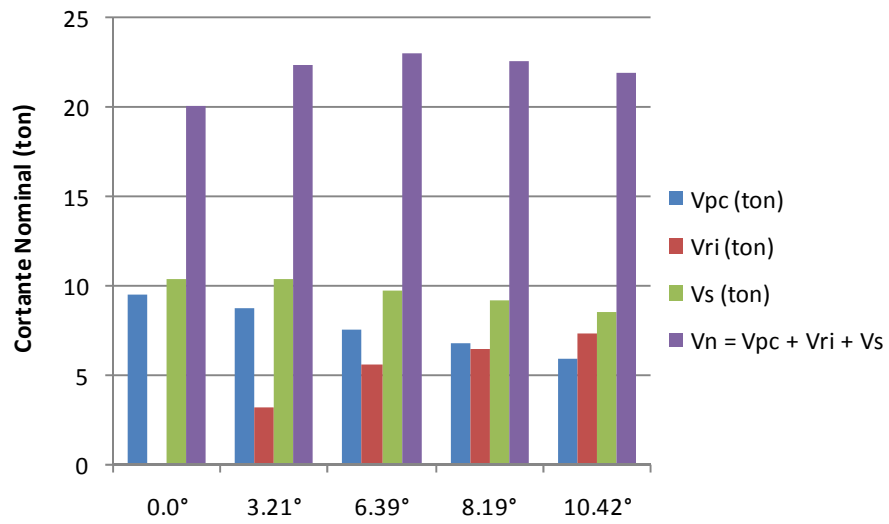


Figura 3.24 Resistencia nominal a cortante $0.5 M_n$

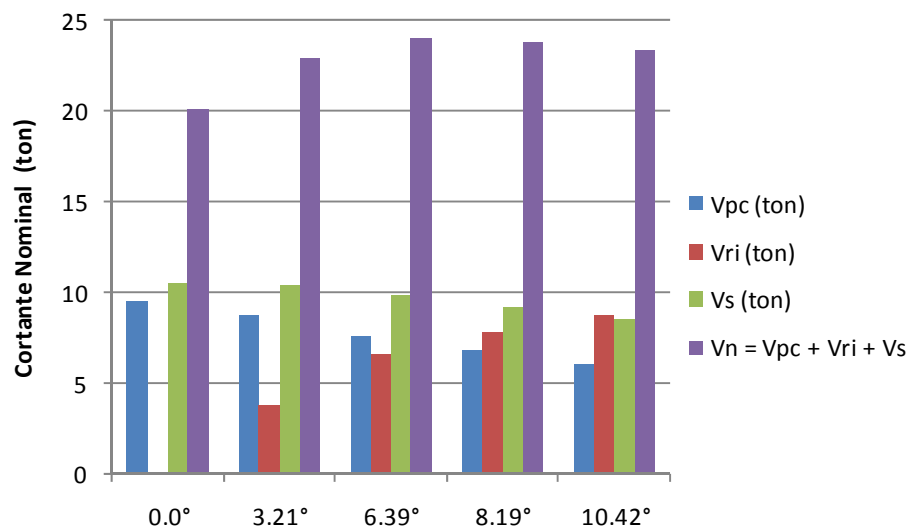


Figura 3.25 Resistencia nominal a cortante $0.85 M_n^+$

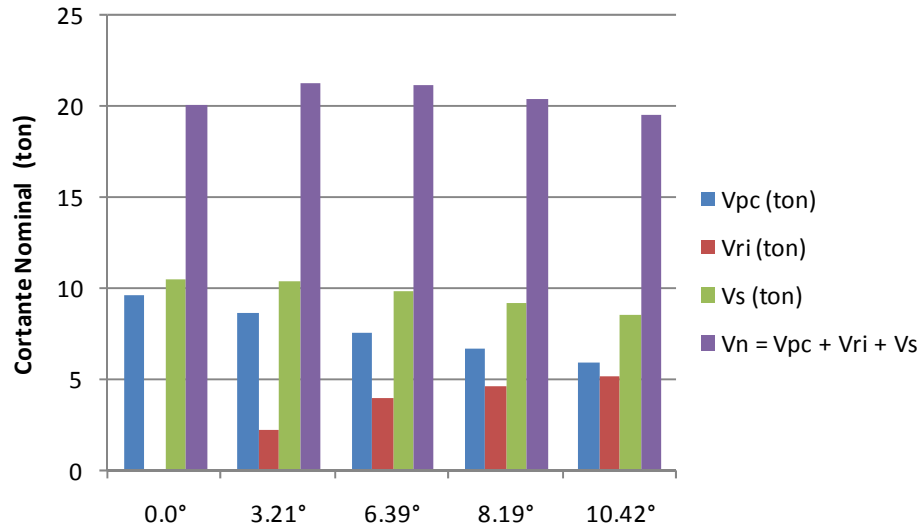


Figura 3.26 Resistencia nominal a cortante $0.5 M_n^+$

En las figuras 3.27 a 3.30 se observa la contribución del acero de refuerzo, V_{ri} , en relación al cortante nominal, V_n , donde se observa que conforme crece el ángulo de acartelamiento, aumenta proporcionalmente su contribución respecto al cortante del acero longitudinal, V_s . Además, se observa que un ángulo mayor contribuye más que V_s , como se muestra en las figuras 3.23 y 3.25.

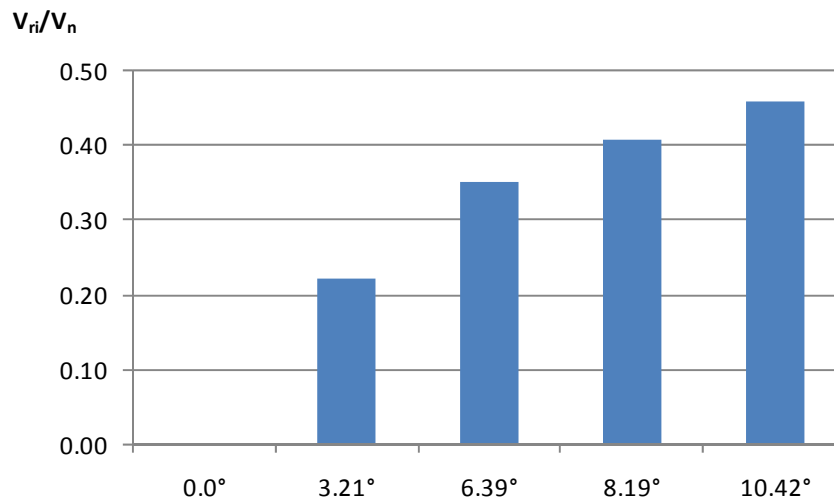


Figura 3.27 Contribución de V_{ri} con $0.85 M_n^-$

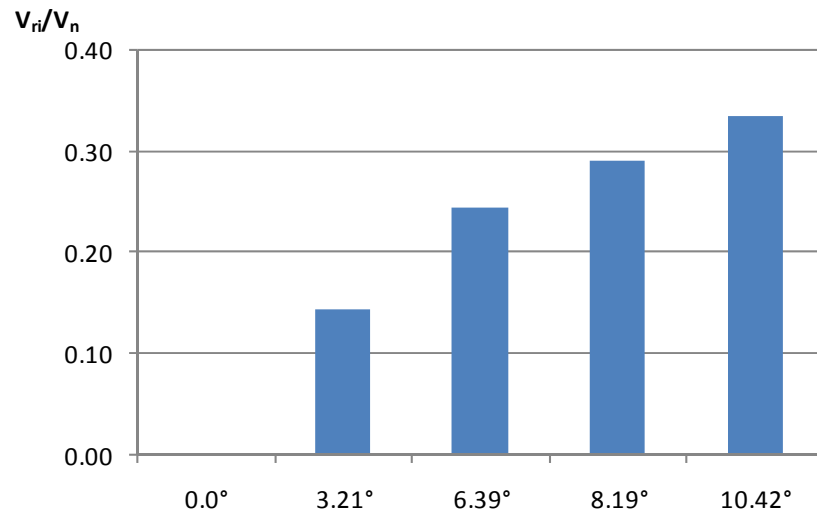


Figura 3.28 Contribución de V_{ri} con $0.5 M_n$

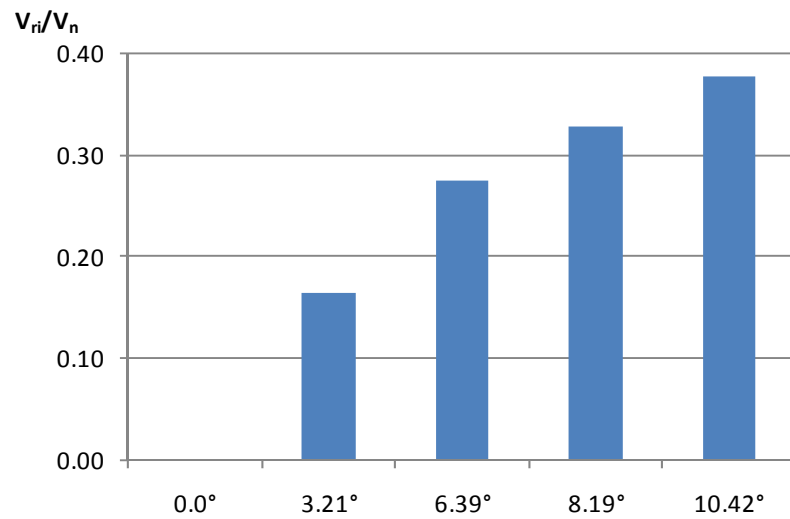


Figura 3.29 Contribución de V_{ri} con $0.85 M_n$

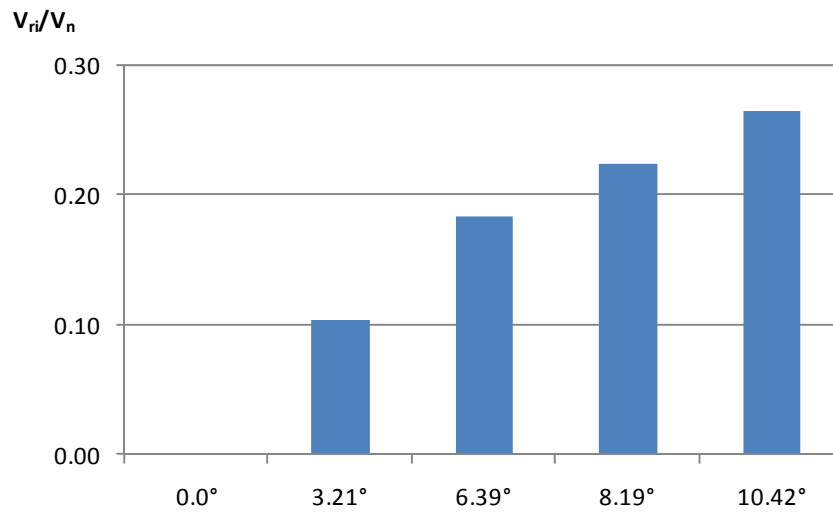


Figura 3.30 Contribución de V_{ri} con $0.5 M_n^+$

Capítulo 4

Programa experimental

4.1 Introducción

En este capítulo se describe el proceso de construcción de las trabes acarteladas a ensayar cíclicamente en condición de continuidad. La construcción de los especímenes se realizó como comúnmente se efectúa en la práctica actual mexicana.

Los especímenes fueron contruidos en el laboratorio e instalaciones de la UAM-Azcapotzalco con el apoyo de alumnos de los talleres de ingeniería civil, de servicio social, proyectos terminales de licenciatura y tesista del posgrado de ingeniería estructural.

La instrumentación de todos los especímenes se divide en interna y externa. La instrumentación interna fue densa, empleando entre 54 y 58 deformímetros eléctricos (strain gages) por espécimen para monitorear adecuadamente el comportamiento del refuerzo longitudinal y el refuerzo transversal. La instrumentación externa constó de strain gages de concreto, celdas de carga y de transductores de desplazamiento, que fueron colocados directamente en los especímenes. En la sección 4.3 de este capítulo se presentara con más detalle la instrumentación general de los especímenes.

4.2 Construcción de los especímenes

4.2.1 Armado de los especímenes

Para la construcción de los especímenes se ejecutaron los armados basándose en el diseño y en los croquis de cada una de las trabes, columna y dado. El refuerzo transversal se colocó de manera que alternaran uno a uno el lado de los remates. Cada estribo se sujetó al armado correspondiente por medio de amarres dobles de alambre recocado.

La figura 4.1 ilustra el proceso típico de habilitado de los especímenes utilizado en este trabajo de investigación.

4.2.2 Diseño de la cimbra

El diseño de la cimbra fue elaborado mediante placas o tapas de madera contrachapada, llamada comúnmente triplay, las cuales fueron reforzadas mediante soportes longitudinales y laterales intermedios, (barrotes), para evitar el alabeo que pudiera ocasionar la presión del concreto. La cimbra se adaptó para que se coloran los

especímenes monolíticamente, para dar el ancho de las trabes y la columna se colocaron separadores, como se observa en la figura 4.2.



a) Armado de la trabe TASCV0a0-R1c

b) Armado de la columna



c) Armado del dado

Figura 4.1 Proceso de armado de los especímenes de prueba

Para dar estabilidad lateral a las tapas de las cartelas, éstas se rigidizaron mediante clavos y espárragos en la parte inferior como en la parte superior, como se observa en la figura 4.2. Para la estabilidad de las tapas de la columna, se rigidizaron mediante espárragos y alambre recocido. Finalmente, para rigidizar a la cimbra del dado (cajón), se realizó por medio de clavos en la parte inferior, como también mediante espárragos y ángulos de acero en la parte central del cajón, como se muestra en la figura 4.3.

Con ayuda de los espárragos de acero colocados en la cimbra se facilitó el descimbrado de todos los especímenes.



Figura 4.2 Tapas de madera (cartelas), con soportes laterales longitudinales e intermedios y espárragos de acero

Cabe mencionar que la cimbra fue la misma para los especímenes con y sin refuerzo transversal, con la diferencia que se fue adaptando para dar el ángulo de acartelamiento correspondiente.



Figura 4.3 Tapas de madera, (columna y dado) con soportes laterales longitudinales e intermedios y espárragos de acero

En lo referente para la realización del ángulo de acartelamiento en cada uno de los especímenes, se dibujo en la parte interior de la tapa de madera las dimensiones que correspondían a cada trabe. A partir de los trazos, se colocó tramos de madera con las medidas requeridas, como se muestra en la figura 4.4, y sobre ellas se colocaron placas de maderas para la base de las trabes. En las uniones de las placas de madera se colocó una mezcla de yeso, con la cual se le dio un buen terminado a las trabes, como se muestra en la figura 4.5.



Figura 4.4 Colocación de tramos de madera para el ángulo de acartelamiento de los especímenes



Figura 4.5 Acabado con mezcla yeso en las trabes

El proceso de montaje del armado del espécimen se realizó teniendo una vez completada la cimbra del espécimen. Cabe mencionar que este proceso se realizó para todos los especímenes de este trabajo de investigación, primeramente se colocó el armado de acero en la cimbra del dado, posteriormente se montaron las tapas de la columna a la cimbra del dado y por último se colocó los cajones de las cartelas, este proceso se muestra en la figura 4.6.

El armado de acero se centró y ubicó en la cimbra, empleando calzas para dar el recubrimiento necesario.



a) Montado del armado a la cimbra del dado



b) Montado de tapas de columna



c) Montado de las tapas de madera de las cartelas

Figura 4.6 Proceso de montaje de la cimbra

4.2.3 Colado de los especímenes

El procedimiento de construcción que siguió después de haber sido preparada y montada la cimbra para el colado de un espécimen, fue el colado del mismo, toda vez que el armado fue debidamente instrumentado, colocado correctamente dentro de la cimbra y calzado para dar el recubrimiento estipulado de 5 cm.

El colado de los especímenes se realizó en dos partes, primeramente se coló el dado y una cuarta parte de la columna, dejando fraguar el concreto aproximadamente cuatro horas, esto con la finalidad de que el concreto no se saliera por la parte superior de la cimbra del dado. Posteriormente se coló el resto de la columna y las cartelas del espécimen.

Cabe mencionar que el tiempo que se dejó fraguar el concreto fue el necesario para evitar una junta fría en el espécimen, y esto trajera consigo problemas durante el ensaye de cada uno de los especímenes.

El concreto se dosificó por volumen, como se reporta en el Apéndice A, siguiendo las recomendaciones de los técnicos de laboratorio de estructuras de la UAM-A, para lograr una resistencia $f'_c = 250 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días, como lo menciona Archundia en 2004.

La mezcla de concreto se realizó con ayuda de una revolvedora eléctrica, con capacidad nominal de medio saco de cemento, posteriormente se transportó una vez que la mezcla presentaba una buena consistencia. La figura 4.7 muestra el proceso de colado.

Después de cada proceso de colado de concreto para el espécimen, se prosiguió al vibrado del concreto para que no quedaran oquedades en las partes que componen al espécimen, como son: cartelas, columna y dado; cabe mencionar que algunas zonas existe congestionamiento de acero, lo cual dificultó el colado.

El vibrado se realizó con ayuda de un vibrador eléctrico, además de realizarlo también con varillas corrugadas, esto debido que en algunas zonas con congestionamiento de acero no era posible introducir el vibrador eléctrico. Durante el proceso de vibrado se tuvo especial cuidado de no dañar los deformímetros eléctricos instalados en todo el espécimen.

En el proceso de colado de cada espécimen se obtuvieron siete cilindros de control y dos viguetas de control, con el fin de monitorear la resistencia real de concreto durante el curado y al momento de ensaye de los travesaños.

Al término del colado de cada uno de los especímenes, se le dio un acabado a la superficie descubierta, (cartelas y dado) como se muestra en la figura 4.7.



a) Mezcla de concreto y llenado de viguetas y cilindros de control



b) Transporte de concreto



c) Vibrado de los especímenes



d) Acabado de la superficie descubierta

Figura 4.7 Proceso de colado de los especímenes

4.2.4 Descimbrado de los especímenes

El descimbrado se realizó en dos partes, el primero consistió que a los tres días después del colado, se descimbró las tapas laterales del espécimen, como se muestra en la figura 4.8, lo cual se facilitó de acuerdo en lo mencionado en la sección 4.2.2, el segundo consistió en descimbrar el resto de la cimbra a los 28 días de edad del concreto. La cimbra se retiró teniendo cuidado de no dañar las esquinas de las trabes y columna, además de no perjudicar los cables de los strain gages.

El curado de los especímenes se realizó mojándolos periódicamente y dejándolos secar en condiciones ambientales.



Figura 4.8 Descimbrado del espécimen

4.2.5 Preparación de los especímenes de prueba

Terminado el proceso de curado de los especímenes de prueba, se prosiguió a montar el espécimen en el piso de reacción, con ayuda de una grúa viajera eléctrica con capacidad de tres toneladas. La cual facilita las maniobras y se tiene mayor seguridad, como se muestra en la figura 4.9. Posteriormente, se colocaron las placas y anclas para sujetar y fijar el espécimen al piso de reacción.

Para la captura de la información gráfica generada en los ensayos, los especímenes se pintaron de color blanco con el propósito de facilitar la visualización de las grietas generadas durante el ensaye. Además, para simplificar la ubicación y progresión del agrietamiento, se dibujó una retícula en ambas caras de los especímenes, como se muestra en la figura 4.10.



Figura 4.9 Traslado del espécimen al piso de reacción



Figura 4.10 Preparación de los especímenes de prueba

4.3 Instrumentación de los especímenes

La instrumentación de los especímenes de prueba tiene como propósito medir diferentes parámetros, que posteriormente servirán para la obtención de información, como lo es la deformación interna que sufre el acero longitudinal y el transversal ante la aplicación de cargas cíclicas, la contribución del acero transversal a la trabe entre otros. La instrumentación interna de los especímenes fue densa y se realizó mediante deformímetros eléctricos (strain gages).

Los strain gages se colocaron para todos los elementos en una de la barras del acero longitudinal y acero transversal, tanto en la viga como en la columna, como se muestra en la figura 4.11.

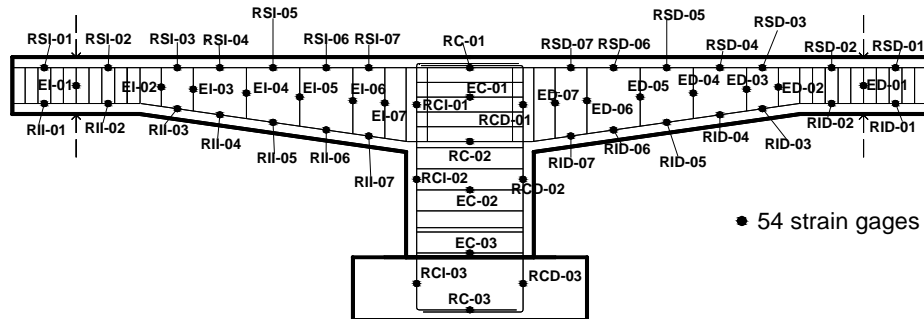


Figura 4.11 Instrumentación interna de los especímenes (TASCV3 α 3-R1c)

Tabla 4.1 Número de strain gages por espécimen

Especimen	Total de Strain gages	Cartela Izquierda	Cartela Derecha	Columna		
				Parte superior	Parte Inferior	Parte Central
TASCV0α0-R1c	58	23	23	5	3	4
TASCV3α1-R1c	54	21	21	5	3	4
TASCV3α2-R1c	54	21	21	5	3	4
TASCV3α3-R1c	54	21	21	5	3	4
TASCV3α4-R1c	58	23	23	5	3	4

El proceso de colocación de strain gages consistió en limar y esmerilar el área donde correspondía colocar el deformímetro eléctrico, hasta desvanecer la corrugación de la varilla, dejando una superficie completamente lisa, tipo espejo, limpiando la superficie de impurezas y dejándola lista para pegar el strain gage y una terminal, con pegamento especial. Una vez pegados, se procedió a soldar pequeños alambres entre el strain gage y la terminal, y se soldó alambres en la terminal, terminado este proceso, se prosiguió a proteger el strain gage con un barniz especial, caucho y se envolvió con papel aluminio, después se cubrió con unas capas de solución de acetona-resistol 5000, para aislarlo y protegerlo de la humedad del colado, también se cubrieron los cables con dicha solución. Este proceso se muestra en la figura 4.12.



a) Superficie lisa tipo espejo



b) Pegado de strain gage y terminal



c) Soldado de cables



d) Envoltura y protección



e) Protección con papel aluminio



f) Protección con acetona-resistol 5000

Figura 4.12 Procedimiento de instrumentación interna

Debido a que el cableado correspondiente a la instrumentación interna de cada espécimen era intenso, se formaron cuatro cordones de salida, dos por cada lado, se identificó cada cable y los cordones se amarraron mediante cinchos de plástico en cada lecho en la parte interna de cada lecho, de tal manera que fueran protegidos por los mismos al momento de la ejecución del colado.

Los cordones fueron sacados por la columna a unos 15 centímetros arriba del dado. La cimbra que forma parte de la columna, se adecuó para que salieran los cordones de strain gages como se muestra en la figura 4.13



Figura 4.13 Salida de cordones de strain gages

Cabe mencionar que los strain gages fueron probados antes y después del colado, esto con la finalidad de saber si los strain gages estaban funcionando adecuadamente.

Así como se llevó a cabo la instrumentación interna de los especímenes, también se llevó a cabo una instrumentación externa. La instrumentación externa consistió en transductores de desplazamiento (TI-i y TD-i), micrómetros (TRI y TRD), strain gages de concreto (SGCi) y celdas de carga. Los transductores de desplazamiento se colocaron en la parte inferior y a lo largo de cada cartela, el primero se colocó al inicio de la trabe, el segundo en el vértice de cambio de sección de prismática a acartelada y el tercero a una distancia de 45 cm del paño exterior del nudo viga-columna hacia la trabe, como se observa en la figura 4.14.

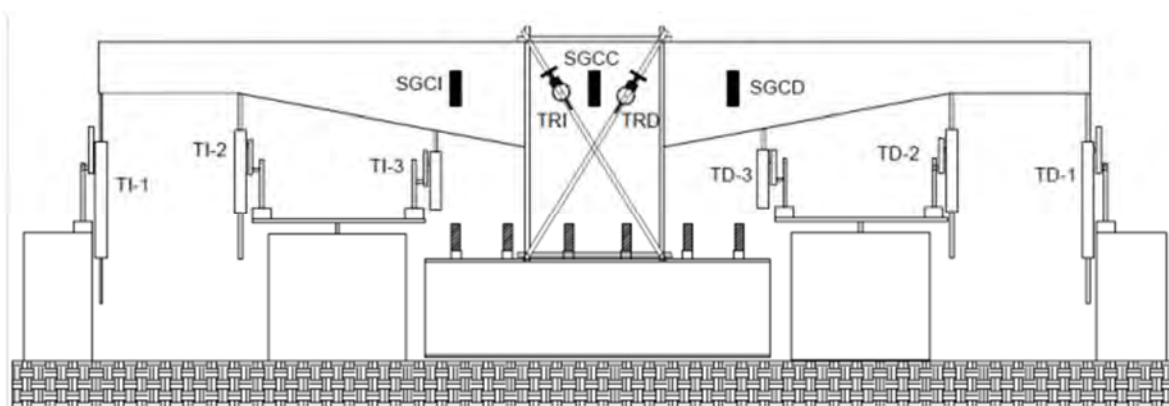


Figura 4.14 Esquema de instrumentación externa de los especímenes

4.4 Dispositivo de carga y adquisición de datos

Los ensayos se realizaron en el laboratorio de estructuras, como se mencionó en el capítulo 3 sección 3.2. El dispositivo de ensaye fue diseñado para aplicar cargas reversibles, y consistió en dos placas dobles de acero en la parte superior y en la parte inferior en cada extremo del espécimen, unidas mediante cuatro barras roscadas de 1 ½ pulgada de diámetro por extremo y tensadas mediante tuercas. A las placas inferiores se les soldó una placa de acero 1½ pulgada de espesor para darle estabilidad y rigidez a la misma. A estas placas se les soldó la conexión para la aplicación de la carga cíclica (empuje y jale).

La conexión se compuso de dos tramos de tubo de acero con diámetro exterior de cuatro pulgadas y diámetro interior de tres pulgadas con una longitud de 17cm cada uno, un muñón de acero A36, el cual tiene una perforación de tres pulgadas en su parte central. En su parte inferior cuenta con un apéndice de 1¾ de pulgada de diámetro y cinco centímetros de largo, y un perno de tres pulgadas de diámetro con una longitud de 85 cm, que atraviesa los tubos y la parte central del muñón, como se observa en la figura 4.15a.

El muñón se conectó en su parte inferior a una celda de carga, y a su vez la celda de carga se conectó a un actuador de doble acción, como se muestra en la figura 4.15b. El gato hidráulico se sujetó originalmente a una placa de ¾ de pulgada de espesor por medio de cuatro tornillos para evitar su deslizamiento al momento del ensaye, pero en virtud de un problema por pandeo prematuro que se presentó en la placa durante el ensaye del primer espécimen, se utilizó entonces dos placa soldadas de ¾ de pulgada de espesor atiesadas por medio de cartabones de ½ pulgada de espesor, como se muestra en la figura 4.15c. Cabe mencionar que conforme a la geometría del muñón, se permite simular una articulación.



a)

b)



c)

Figura 4.15 Esquema general de la conexión del dispositivo de prueba

En la figura 4.16 se muestra un esquema general del dispositivo montado en el espécimen.

La carga se aplicó por medio de gatos hidráulicos de doble acción, con capacidad de 95 toneladas; éstos fueron accionados con un equipo de bombeo, provisto de válvulas de paso para controlar la aplicación de la carga. Para medir la carga aplicada se ocuparon celdas de carga biaxiales de la empresa Metronic con capacidad de 100 toneladas a compresión y 50 a tensión, las cuales fueron conectadas a un equipo de adquisición de datos modelo TDS-300 equipado con sus cajas de conexiones, modelo ASW-50C con capacidad de 50 canales y otra caja ASW-30C con capacidad para 30 canales conectadas en serie para la captura simultánea de datos. En la figura 4.17 se muestra el equipo de adquisición de datos utilizado durante los ensayos de los especímenes.



Figura 4.16 Esquema del dispositivo montado en TASCV3α4-R1c



Figura 4.17 Equipo de adquisición de datos

Cabe mencionar que fue necesario calibrar las celdas de carga debido a que contaban con su propio convertidor para conocer la carga aplicada; ésto se realizó con ayuda del equipo de adquisición de datos (TDS) y la maquina universal.

En el TDS se conectaron los cuatro cordones de cables correspondientes a los strain gages de cada espécimen debidamente identificados. En la caja de conexiones con capacidad de 30 canales fueron conectados los cables que pertenecían a las dos celdas de carga, los transductores de desplazamiento y parte de los strain gages, y, en la otra caja con capacidad para 50 canales, se conectaron el resto de los strain gages y tres strain gages de concreto. En la figura 4.18 se muestra la instrumentación interna y externa conectada al equipo de adquisición de datos.

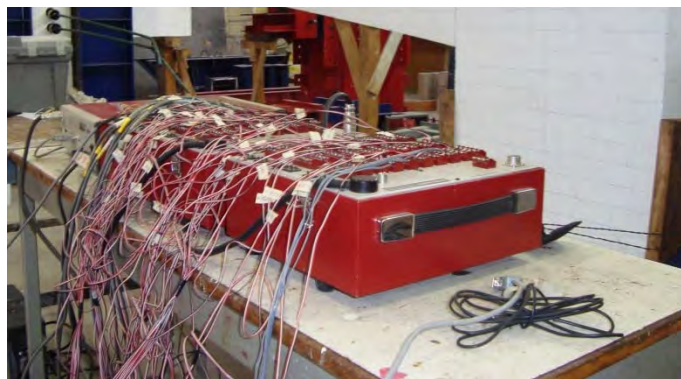


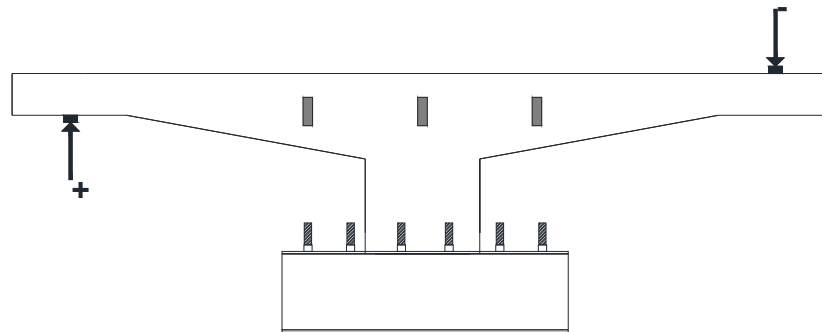
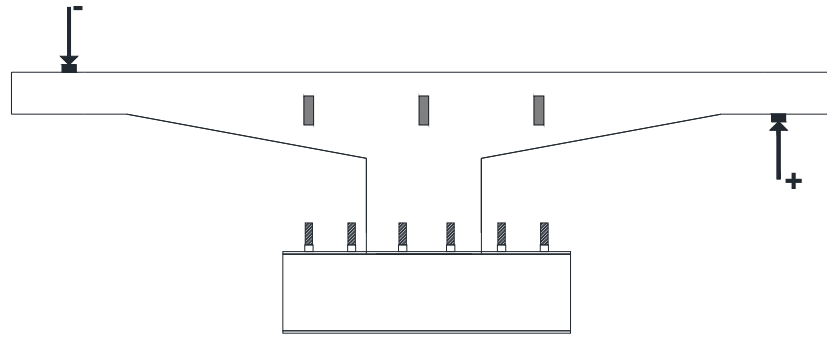
Figura 4.18 Instrumentación interna y externa conectada al equipo de adquisición de datos

El equipo de adquisición de datos con el que se monitoreó los ensayos opera bajo un programa que permite el seguimiento en tiempo real de algunos canales. Los canales que se monitorearon como controles durante el ensaye; fueron los desplazamientos verticales en el vértice de cambio de sección de prismática a acartelada, y las cargas aplicadas en los gatos hidráulicos ($+P$ y $-P$).

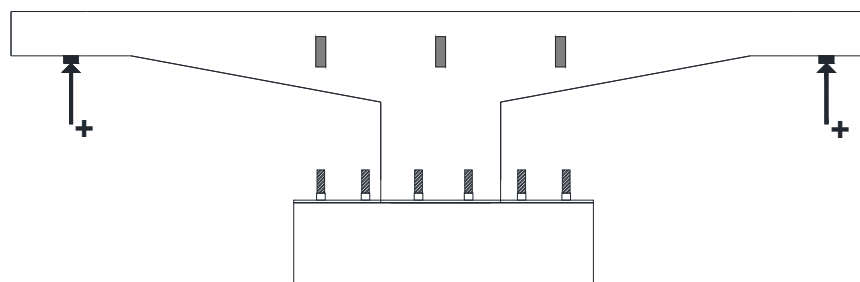
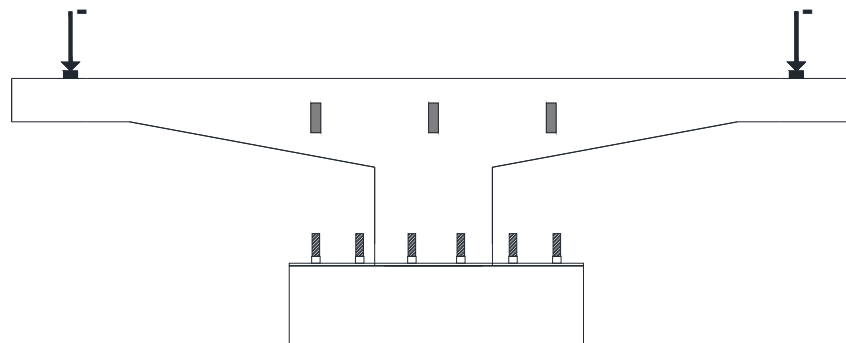
Debido a la geometría del espécimen y en la forma en que se aplicaron las cargas, se considero como primera opción medios ciclos positivos cuando se aplicaba carga (empuje), en un extremo del espécimen y medios ciclos negativos cuando se aplicaba carga (jale), en el otro extremo. Una vez aplicadas las cargas, (empuje y jale) se proseguía con la descarga, y se proseguía a otro medio ciclo.

Como una segunda opción se consideró medios ciclos negativos cuando se aplicaba carga (jale), en los extremos del espécimen. Una vez aplicada la carga se proseguía con la descarga y se proseguía con otro medio ciclo positivo cuando se aplicaba carga (empuje), en los extremos del espécimen. Una vez aplicadas las cargas, se proseguía con la descarga, y se proseguía a otro medio ciclo.

En la figura 4.19 se muestra el esquema general de la aplicación de la carga aplicada en el espécimen. Cabe mencionar que la figura 4.18a se presenta la carga aplicada en el espécimen en un extremo con carga de empuje y en otro extremo jale, ya que fue la primera opción para el ensaye experimental de las trabes. Debido a que el elemento al que se sometió la carga no se comportó como se esperaba, dado que favoreció la falla del nudo antes que la falla por cortante de la zona acartelada, se prosiguió a ensayar los demás especímenes con la segunda opción, como se mencionó con anterioridad y como a la vez se muestra en la figura 4.19b.



a) Primera opción



b) Segunda opción

Figura 4.19 Esquema general de aplicación de carga a los especímenes

Capítulo 5

Metodología experimental

5.1 Introducción

En este capítulo se reportan aspectos relacionados con la preparación de los especímenes antes de efectuarse los correspondientes ensayos. Además, se describe la secuencia de aplicación de la carga y se describe la manera en la que se realizó la captura gráfica a partir de los patrones de agrietamiento.

5.2 Preparación de los especímenes de prueba

Como se mencionó en la sección 4.2.5, para facilitar la captura de información gráfica presentada en los ensayos, los especímenes se prepararon como lo reporta Grande (2009), según la práctica común para el ensaye de elementos de concreto reforzado. Cada espécimen se pintó de color blanco, con la finalidad de facilitar la visualización de las grietas generadas durante el ensaye experimental. Además, se dibujó una retícula con cuadros de 5 cm en todas las caras de los especímenes, con la finalidad de simplificar la ubicación evolutiva del agrietamiento. En la figura 5.1 se muestra una perspectiva del elemento TASCv3a4-R1c totalmente preparado para su ensaye.



Figura 5.1 Elemento TASCv3a4-R1c preparado para su ensaye

5.3 Historia del desplazamiento

Los ensayos se controlaron por desplazamiento medido en el vértice en el cambio de sección de acartelada a prismática. Los incrementos de desplazamiento entre cada ciclo fueron de 3 mm hasta un desplazamiento de 12 mm, dado que en este intervalo de desplazamientos es donde se presentó el primer agrietamiento importante en ensayos previos en vigas con refuerzo a cortante (por ejemplo, Archundia-Aranda y Tena-Colunga 2008, Grande 2009) y, por ello, emplear este incremento de desplazamiento permitirá definir con exactitud tanto la rigidez elástica del espécimen como el desplazamiento asociado al primer agrietamiento. Después de alcanzar los 12 mm de desplazamiento, se incrementaron 4 mm entre cada ciclo.

Para cada sentido de carga (+P y -P) y cada medio ciclo de carga, se realizó una repetición para evaluar de esa forma la degradación de la rigidez y resistencia del espécimen para un mismo desplazamiento. En la figura 5.2 se muestra la historia de carga tipo utilizada en todos los ensayos, donde las deflexiones negativas indican que la carga se aplica hacia abajo.

Debido al daño acumulado en los elementos o en alguna parte de ellos y a la sensibilidad de los transductores de desplazamiento, fue imposible desarrollar rigurosamente la historia de carga mostrada en la figura 5.2. Los ensayos se terminaron cuando los elementos ya no eran capaces de soportar carga debido al daño presentado.

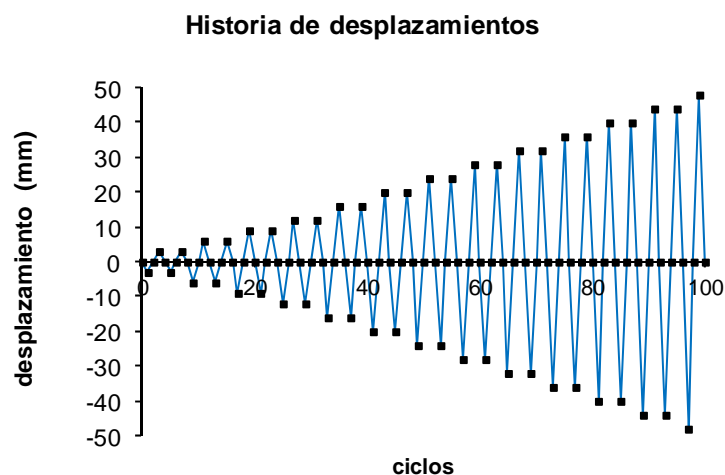


Figura 5.2 Historia de desplazamiento aplicada en los especímenes

5.4 Registro del agrietamiento

Para observar la evolución del daño en los especímenes, se emplearon cuatro colores diferentes para identificar las grietas que aparecían durante la prueba en los picos de máxima deflexión en cada ciclo, y se identificaron con el desplazamiento máximo objetivo de ese medio ciclo, como se muestra en la figura 5.3. Se empleó el color negro para el agrietamiento producido en el primer medio ciclo para un desplazamiento objetivo en dirección de la carga negativa $-P$, el color azul para el agrietamiento producido en el primer medio ciclo para un desplazamiento objetivo en dirección de la carga positiva $+P$, y para los medios ciclos de repetición se empleó los colores verde y rojo respectivamente (figura 5.3).

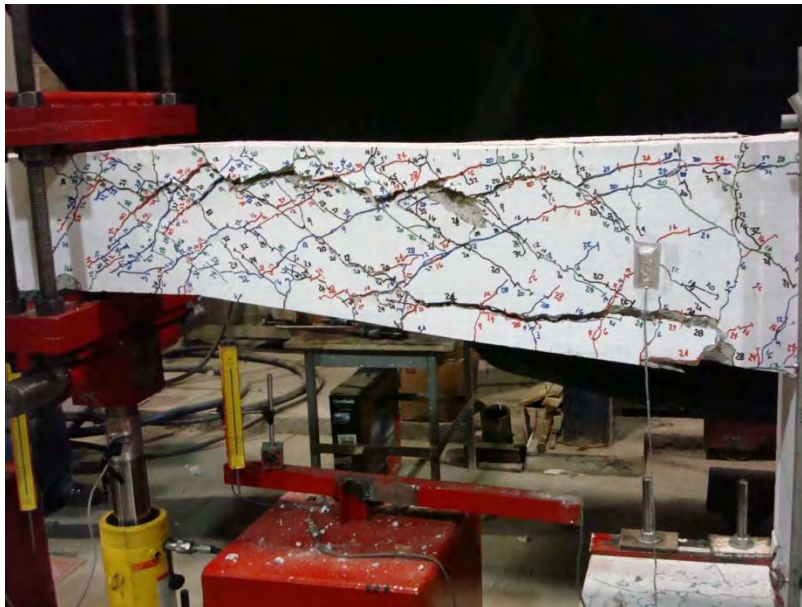


Figura 5.3 Identificación evolutiva de grietas durante la prueba

También se registró el progreso de la anchura de las grietas cada vez que se observaban que éstas eran importantes y aumentaban su espesor notablemente. El patrón de agrietamiento se capturó en dibujos a escala de los especímenes, los cuales también estaban cuadriculados según los modelos reales, como se muestra en la figura 5.4. Además, durante los experimentos se tomaron fotografías y notas cuando sucedía algún detalle importante, los cuales complementan la información obtenida. Para todos los especímenes, se presentan únicamente los patrones de agrietamiento en la cara frontal y posterior.



a) elemento real TASCV3 α 4-R1c



b) patrón de agrietamiento a partir del elemento real

Figura 5.4 Patrón de agrietamiento del elemento TASCV3 α 4-R1c, $\Delta = 45\text{mm}$

Capítulo 6

Elementos con refuerzo transversal: Resultados experimentales

6.1 Introducción

Se realizaron los ensayos experimentales de los especímenes con refuerzo transversal según se describió en la metodología (capítulo cinco). En el presente capítulo se reporta el comportamiento de los elementos TASCV3 α i-R1c con base en las observaciones realizadas durante los ensayos y en los registros obtenidos de la instrumentación. Principalmente, se emplearon esquemas del progreso evolutivo de grietas, historia fotográfica, curva histórica, carga-deflexión, registro de los deformímetros eléctricos adheridos al acero de refuerzo, transversal y de concreto, como también el registro de los transductores de desplazamiento.

También, se analiza la tendencia de la curva carga-deflexión y se estudia la evolución en la anchura de algunas grietas, se presenta el comportamiento del refuerzo longitudinal y transversal y se incluye la distribución de deformaciones a lo largo de la trabe.

6.2 Comportamiento general

Para los especímenes ensayados se obtuvieron las deflexiones asociadas al primer agrietamiento diagonal, Δ_{agr} , agrietamiento último o de falla, Δ_u , y agrietamiento al colapso Δ_{clps} , así como también sus respectivos cortantes de la cartela, (V_{agr} , V_u , V_{clps}) donde se presentó la falla. La determinación de cada uno de las deflexiones y cortantes respectivos se realizó con lo observado durante la prueba experimental y posteriormente cotejados analíticamente. Estos cortantes y deflexiones características permitirán describir el comportamiento de los especímenes.

6.2.1 Primer agrietamiento diagonal

Durante el ensayo experimental se observaron las apariciones de la primera grieta inclinada (figura 6.1a), se tomó en cuenta la experiencia adquirida y lo comentado en ensayos previos (Grande *et al.* 2009), además se prestó atención en la zona de los vértices y en la parte acartelada de la viga. En lo observado durante el ensayo, se apreció que las grietas de contracción que se marcaron antes de la prueba se iban ensanchando durante la prueba experimental, y de ahí mismo nacían o se generaban las primeras grietas inclinadas.

Cuando la grieta diagonal apareció, se registró la deflexión y el ciclo de carga; este dato posteriormente se verificó con los lazos de histéresis y envolvente de cada elemento.

6.2.2 Último o de falla

Este estado se asoció con la aparición de la primera grieta diagonal frágil, súbita e importante como se observa en la figura 6.1b. La falla por cortante apareció del lado donde ocurrió el primer agrietamiento diagonal, aunque hay que mencionar que casi siempre ambas cartelas presentaban el primer agrietamiento diagonal, pero no siempre se presentaba la falla por cortante en ambas, sino primero se presentaba en una y después de unos ciclos se presentaba en la otra. Este estado se verificó analíticamente de la misma manera que el primer agrietamiento diagonal.

6.2.3 Colapso

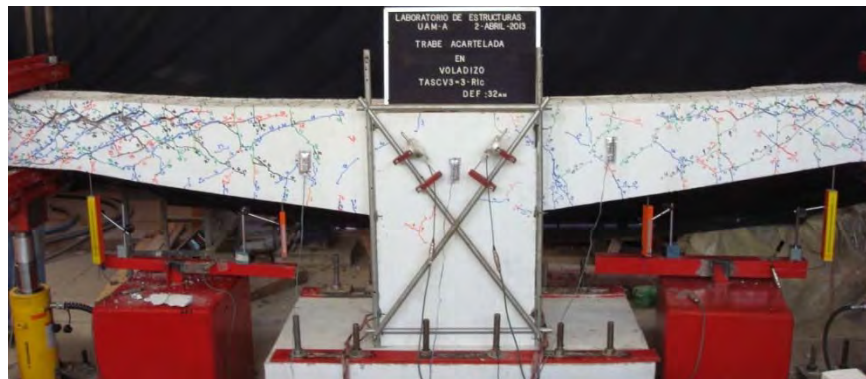
Una vez alcanzada la falla por cortante, se continuó con el patrón de desplazamiento. El máximo desplazamiento al que se llegó fue de 32 mm en todos los especímenes, excepto el espécimen TASCV3 α 4-R1c. Además, se observó desconchamiento y desprendimiento de concreto en la zona de la aplicación de la carga y desprendimiento del recubrimiento en la parte superior e inferior a lo largo de la viga, como se observa en la figura 6.1c. Se notaba que los elementos perdían la capacidad de carga una vez alcanzada la carga máxima. No se llevó al colapso total a los especímenes, debido a que el acero de las trabes se volverá a reutilizar para los especímenes sin refuerzo transversal. Se verificó que el acero longitudinal y transversal no haya rebasado su intervalo elástico.



a) Primer agrietamiento diagonal



b) Agrietamiento de falla



c) Colapso

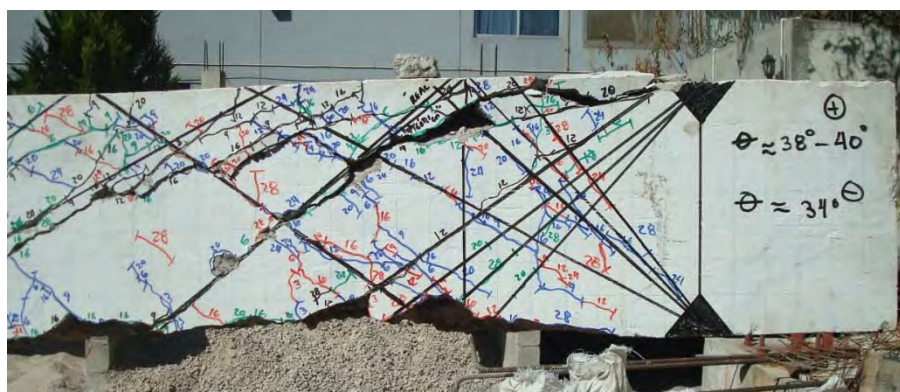
Figura 6.1 Estados característicos del elemento TASCV3α3-R1c

6.3 Elemento TASCV3α1-R1c

El espécimen TASCV3α1-R1c fue sometido a carga cíclica reversible, con el fin de determinar su comportamiento ante estas solicitaciones. La historia de desplazamiento se presenta en la figura 5.2. La aplicación y el sentido de la carga se realizaron conforme a lo

descrito en el capítulo cuatro. El concreto empleado en la construcción del elemento TASCV3α1-R1c tenía una resistencia nominal a la compresión 216 kg/cm^2 (Apéndice A).

El patrón de daño observado fue similar en ambas direcciones de carga, ya que el daño presentado no fue el mismo en ambas cartelas, ya que la cartela del lado derecho fue la que presentó más daño. El daño se caracterizó por la formación de grietas inclinadas en la cartela de lado derecho con ángulos de orientación variables entre 38° y 40° en la dirección positiva y de 34° en la dirección negativa, como se muestra en la figura 6.2a. En la cartela del lado izquierdo se formaron pocas grietas inclinadas relevantes; de hecho, los ángulos de las grietas inclinadas en la dirección positiva y en la dirección negativa fueron menores que 15° (figura 6.2b), por lo cual no se tomaron en cuenta. En general, las grietas se extendieron desde los puntos de aplicación de carga hacia el nudo viga-columna.



a) Cartela derecha



b) Cartela izquierda

Figura 6.2 Dirección y ángulo de grietas principales

La aparición de grietas se propagó en ambas direcciones. La mayor anchura de grieta en la cartela derecha fue de 5mm, mientras que en la cartela izquierda la anchura de grieta

mayor fue de 0.2 mm. Además, la anchura de las grietas en ambas cartelas iba incrementando conforme se iba incrementando el desplazamiento, y se observó que las principales grietas correspondían al medio ciclo negativo. Durante la prueba se observaron también desconchamientos importantes en la cartela derecha en los dos sentidos de la carga, mientras que en la cartela del lado izquierdo no se presentaron desconchamientos. La carga máxima resistida por el espécimen TASCV3α1-R1c en la cartela derecha fue de +27.47 ton y en la cartelada izquierda fue de +28.90 ton. La deflexión máxima en la cartela izquierda medida en el vértice en la unión de la trabe prismática y acartelada en la dirección positiva fue $\Delta = +29.26\text{mm}$ y en la dirección negativa fue $\Delta = -28.83\text{mm}$. La deflexión máxima en la cartela derecha medida en el vértice (unión de la trabe prismática y acartelada) en la dirección positiva fue $\Delta = +29.18\text{mm}$ y en la dirección negativa fue $\Delta = -29.42\text{mm}$. Las grietas asociadas a la falla del espécimen atravesaron todo su ancho, y en este caso se presentó en la cartela derecha.

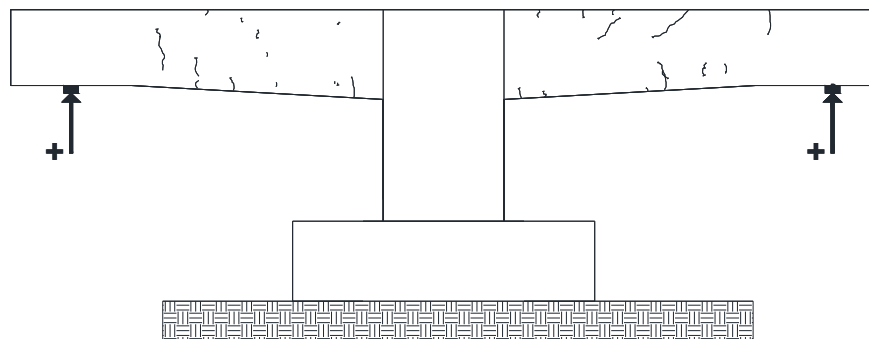
6.3.1 Evolución del daño

Se emplearon cuatro colores diferentes para identificar y marcar las grietas que se generaban durante el ensaye; en los picos de máxima deflexión en cada ciclo se identificó con el desplazamiento máximo objetivo de ese medio ciclo. Se empleó el color negro para el agrietamiento producido en el primer medio ciclo para un desplazamiento objetivo en dirección de la carga negativa -P, el color azul para el agrietamiento producido en el primer medio ciclo para un desplazamiento objetivo en dirección de la carga positiva +P, y para los medios ciclos de repetición se empleó los colores verde y rojo respectivamente; simultáneamente, se tomaron fotografías al término de cada ciclo de carga. En la figura 6.3 se presentan los agrietamientos registrados después del primer ciclo de cada desplazamiento de las deflexiones características (Δ_{agr} , Δ_u , Δ_{clps}).

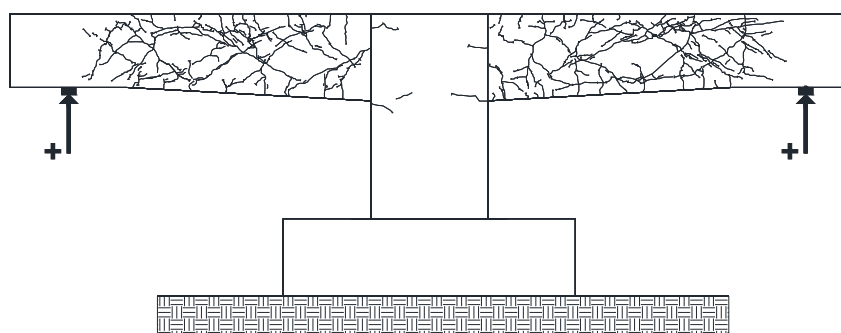
Durante el ensaye experimental, el primer indicio de daño fue la aparición de grietas diagonales que correspondieron al primer agrietamiento diagonal y que forman parte del ciclo de desplazamiento, $\Delta = 3 \text{ mm}$ ($\Delta_{agr} = 4.62 \text{ mm}$ y $V_{agr} = -7.73 \text{ ton}$); las grietas aparecieron en ambas cartelas. Al finalizar los ciclos correspondientes a $\Delta = 9 \text{ mm}$, se observó que aparecieron más grietas diagonales en ambas cartelas con un ancho de grieta máximo de 0.1 mm (figura 6.4b).

En el medio ciclo negativo correspondiente al desplazamiento $\Delta = -16 \text{ mm}$, el ancho máximo en la grieta de la cartela del lado derecho era de 1 mm. En los ciclos correspondientes al desplazamiento $\Delta = 20 \text{ mm}$ se presentó la falla del espécimen en la cartela del lado derecho ($\Delta_u = -21.04 \text{ mm}$ y $V_u = 27.47 \text{ ton}$) con un ancho de grieta máximo de 5mm (figura 6.4c). Para los siguientes ciclos ($\Delta = 24 \text{ mm}$) se generó una grieta paralela

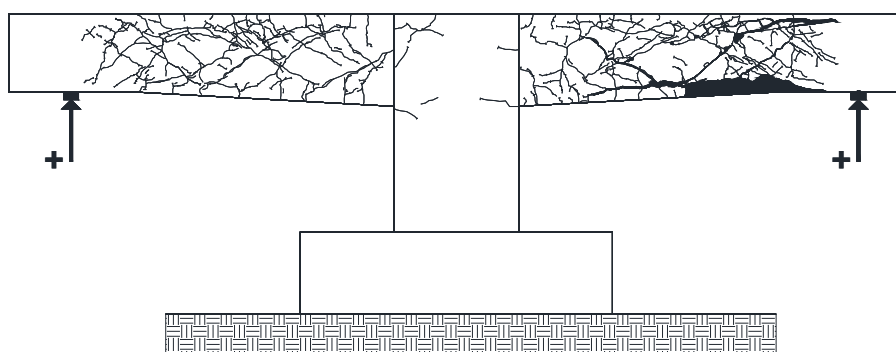
al refuerzo longitudinal y desconchamiento durante la aplicación de la carga en la cartela del lado derecho.



a) Primer agrietamiento



b) Falla



c) Colapso

Figura 6.3 Evolución del agrietamiento



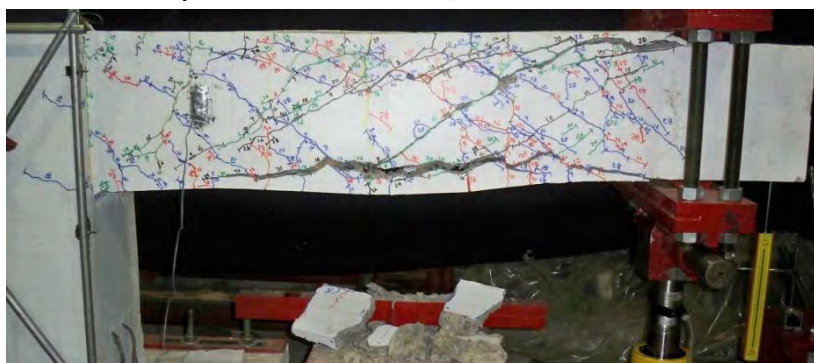
a) Ciclos correspondientes a $\Delta = 3 \text{ mm}$



b) Ciclos correspondientes a $\Delta = 9 \text{ mm}$



c) Ciclo $\Delta = 20 \text{ mm}$, falla de la trabe



d) Ciclo $\Delta = 28 \text{ mm}$, colapso de la trabe

Figura 6.4 Elemento TASCV3α1-R1c durante el ensaye

El colapso de la trabe ocurrió al término del ciclo correspondiente a $\Delta = 28$ mm ($\Delta_{clps} = 29.18$ mm y $V_{clps} = -13.65$ ton), ya que se observó desconchamiento y desprendimiento del recubrimiento en la parte inferior de la cartela derecha; además, se observó desconchamiento en el vértice de la cartela (figura 6.5). También se observó que el espécimen ya se encontraba perdiendo capacidad de carga y fue donde se concluyó el ensaye. Cabe señalar que el espécimen no se llevó al colapso total, debido a que se reutilizará el acero.



a) Desprendimiento de concreto en la parte inferior de la cartela



b) Desconchamiento en la zona del vértice

Figura 6.5 Detalle del daño en la cartela de lado derecho

6.3.2 Comportamiento Carga-Deflexión

En las figuras 6.6 y 6.7 se muestran las curvas de histéresis obtenidas para cada cartela, donde la deflexión Δ es la que fue medida por los transductores de desplazamientos colocados a lo largo de las cartelas y los micrómetros que fueron colocados en el nodo viga-columna, como se menciona en el capítulo cuatro, y el cortante, V , es el que corresponde a la carga cíclica a la que fue sometida el espécimen en sus extremos.

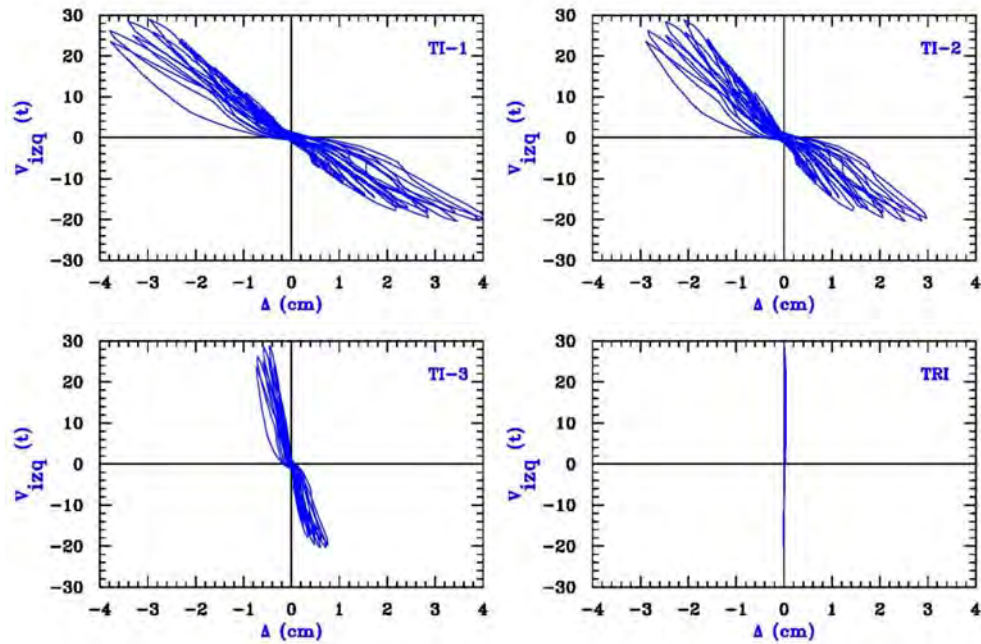


Figura 6.6 Curva de histéresis de cartela izquierda del espécimen TASCV3α1-R1c

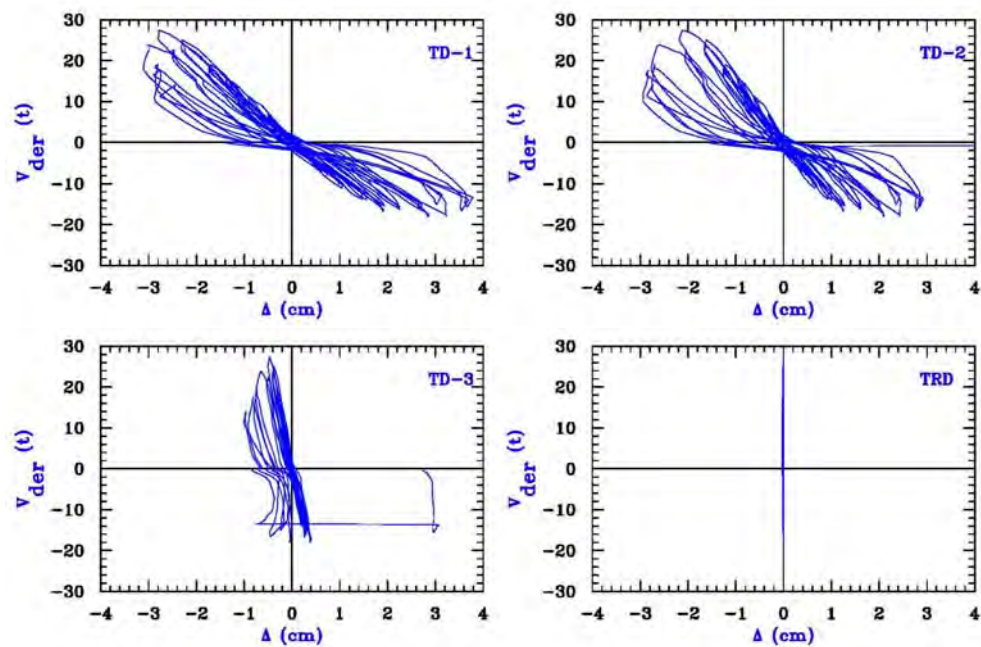


Figura 6.7 Curva de histéresis de cartela derecha del espécimen TASCV3α1-R1c

El cortante máximo resistido por la cartela del lado derecho fue de 27.47 ton y su desplazamiento máximo fue de 29.18 mm. Cabe mencionar que el cortante máximo resistido en la cartela izquierda fue mayor que en la cartela derecha, aunque en la cartela

izquierda no se presentó ningún daño relevante. El comportamiento fuerza cortante contra deflexión en todas las graficas de las figuras 6.6 y 6.7 presentan un estrangulamiento en el origen, además, se aprecia una ligera asimetría en las graficas, la cual se atribuye tanto al armado longitudinal como al peso propio y a la geometría de las cartelas.

Los transductores que fueron monitoreados durante el ensaye fue el TD-2, correspondiente a la cartela derecha, y TI-2 correspondiente a la cartela izquierda, ambos colocados en el vértice de cada cartela respectivamente (figura 6.8).

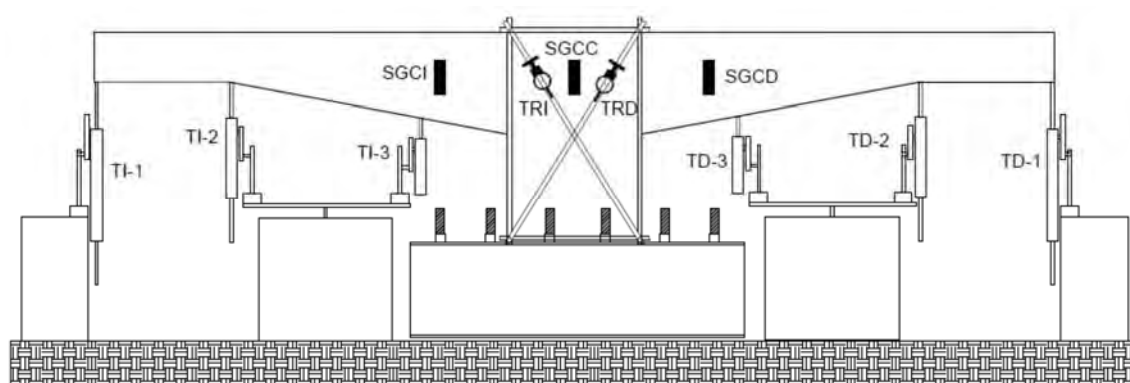


Figura 6.8 Identificación de transductores y strain gages de concreto

6.3.3 Análisis de la instrumentación interna

En esta sección se presenta la evaluación del comportamiento del elemento TASCV3 α 1-R1c con base en los registros de los strain gages adheridos al refuerzo transversal y longitudinal, tanto en las cartelas como en la columna. Además, se presenta el registro de los strain gages adheridos al concreto ubicados en las cartelas y el nodo viga-columna.

6.3.3.1 Refuerzo longitudinal en trabe

En la figura 6.9 se muestra a manera de esquema la identificación de la instrumentación interna en el refuerzo longitudinal del espécimen. En las figuras 6.10 y 6.11 se presenta el comportamiento carga-deformación de los deformímetros eléctricos adheridos al refuerzo longitudinal superior (RS) e inferior (RI) como también al refuerzo longitudinal en el nodo viga-columna (RC), dichos dispositivos se dividen en grupos; los representativos para la cartela de lado izquierdo (I), y para la cartela de lado derecho (D).

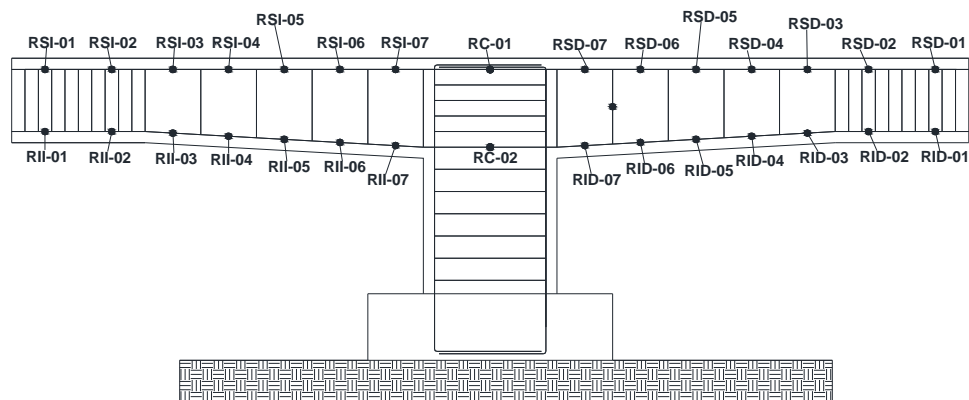


Figura 6.9 Identificación de strain gages en refuerzo longitudinal

En la figura 6.10 se observa un proceso evolutivo de deformación conforme la instrumentación se acerca al nudo viga-columna, donde los deformímetros que sufren fluencia son aquéllos cercanos al nudo viga-columna (RII-05, RII-06, RII-07, RSI-05, RSI-06 y RSI-07). Mientras tanto, en la cartela de lado derecho (figura 6.11) se observa un proceso evolutivo de deformación conforme la instrumentación se acerca al punto de aplicación de carga, incluyendo al deformímetro RID-07. Los deformímetros que experimentan fluencia son: RID-02, RID-03, RSD-03 y RSD-07. Lamentablemente, algunos deformímetros se perdieron y su respuesta no pudo graficarse.

Los niveles de deformación fueron un poco diferentes en ambos lados de las cartelas, ya que el lado que falló fue la cartela del lado derecho. Además, se registró la fluencia en los deformímetros del lado derecho, cercanos al punto de la aplicación de carga, lo cual se corrobora con el patrón de daño mostrado en la figura 6.5a, y con el desconchamiento y desprendimiento del recubrimiento que se presentó en la parte inferior de la cartela derecha, así como el desconchamiento en el vértice de la cartela.

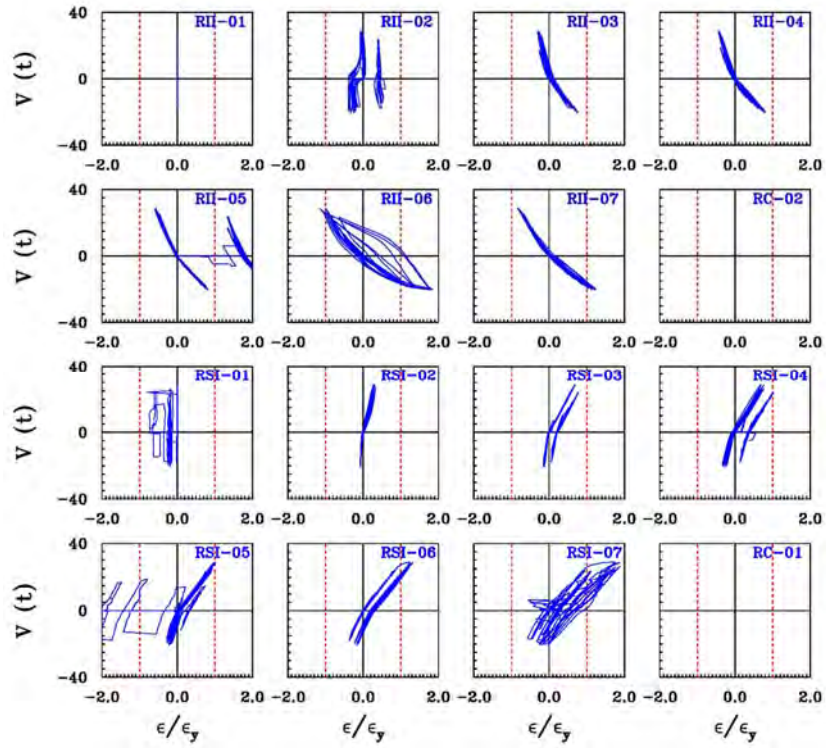


Figura 6.10 Deformaciones en el refuerzo longitudinal cartela izquierda (TASCV3α1-R1c)

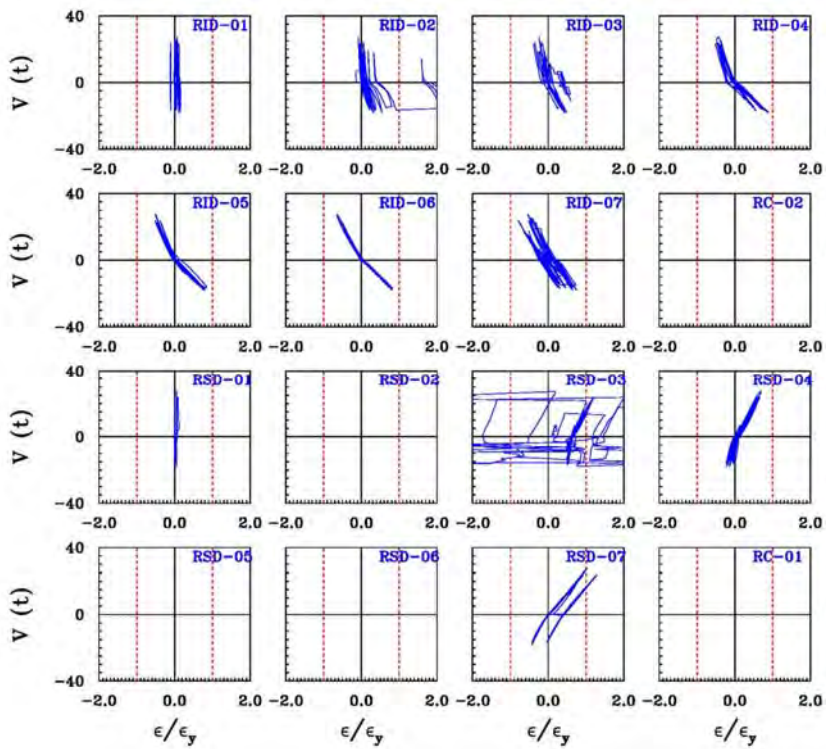


Figura 6.11 Deformaciones en el refuerzo longitudinal cartela derecha (TASCV3α1-R1c)

6.3.3.2 Refuerzo transversal

Los deformímetros se dividieron en dos grupos; los representativos para la cartela de lado izquierdo (I), y para la cartela de lado derecho (D). A manera de esquema, la identificación de la instrumentación interna en el refuerzo transversal se presenta en la figura 6.12. El comportamiento carga-deformación de los deformímetros eléctricos adheridos al refuerzo transversal (E) se presenta en la figura 6.13.

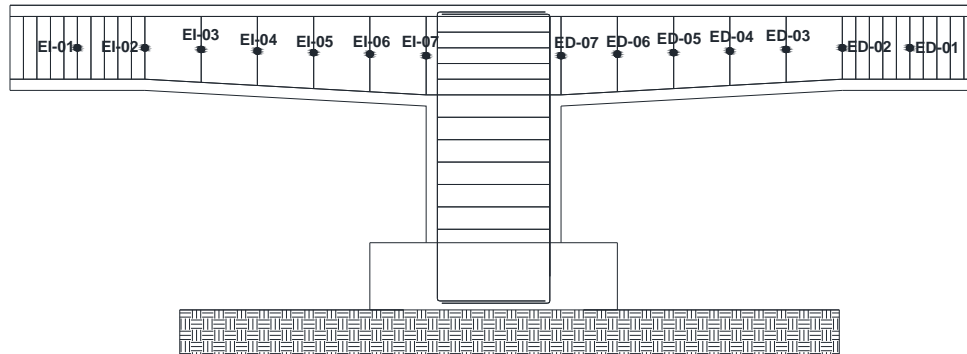


Figura 6.12 Identificación de strain gages en refuerzo transversal

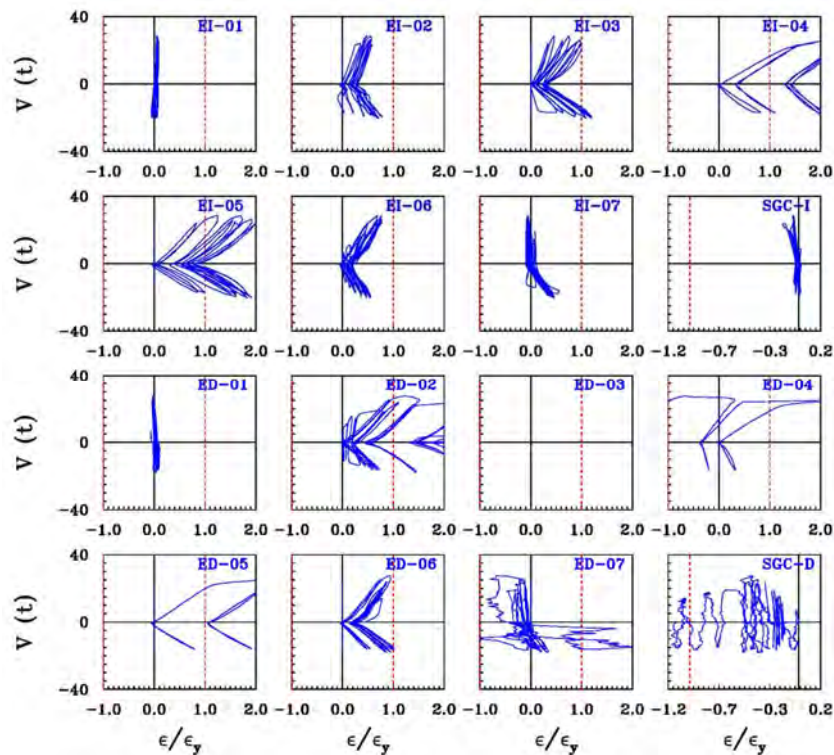


Figura 6.13 Deformaciones en el refuerzo transversal (TASCV3α1-R1c)

Las deformaciones en el refuerzo transversal presentan un proceso evolutivo conforme se acercan al punto de aplicación de carga; esto se evidencia más en la cartela izquierda. En la cartela de lado derecho, que es el lado donde se presentó la falla, se observa que las deformaciones son mayores en casi todos los estribos, con respecto a las del lado izquierdo.

También, se observa que el strain gage de concreto (SGCD) de lado derecho falló debido a la presentación de grietas en esa zona.

6.3.3.3 Refuerzo longitudinal y transversal en la columna

En la figura 6.14 se muestra, a manera de esquema, la identificación de la instrumentación interna en el refuerzo longitudinal y transversal de la columna. En la figura 6.15 se presenta el comportamiento carga-deformación de los deformímetros eléctricos adheridos al refuerzo longitudinal de la columna del lado izquierdo (RCI) y del lado derecho (RCD), como también el refuerzo longitudinal en el nodo viga–columna y en la parte inferior de la columna (RC). Además, se presenta los deformímetros eléctricos adheridos al refuerzo transversal (EC).

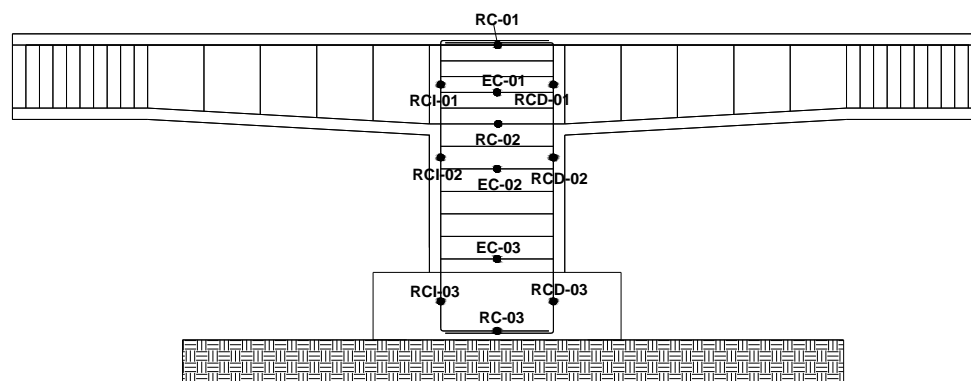


Figura 6.14 Identificación de strain gages en columna

Las carga P_c y V_c que se presentan en la figura 6.15 fueron obtenidas mediante el equilibrio de fuerzas, debido a que la carga cíclica a la que fue sometida el espécimen en sus extremos no se podía graficar directamente como en las figuras anteriores. En la figura 6.15 se observa que las deformaciones en el acero fueron relativamente pequeñas, esto se debe a que no se presenta daño en la columna ni el nodo viga–columna. Lamentablemente, la mayoría de los deformímetros en la columna se perdieron y su respuesta no pudo graficarse.

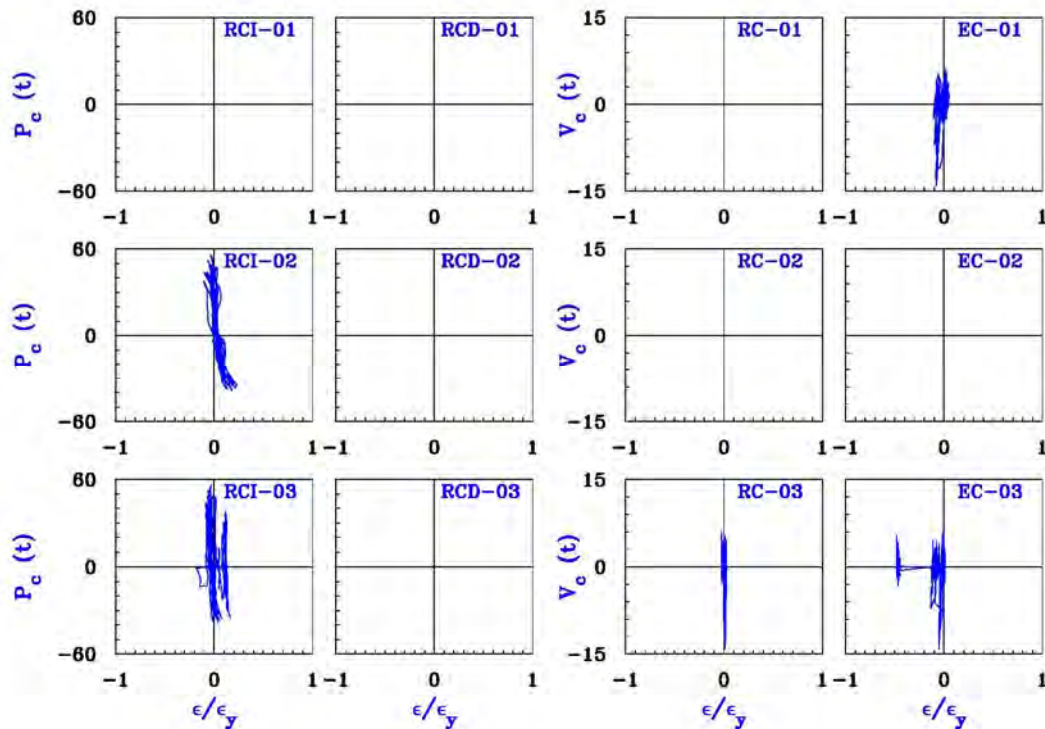
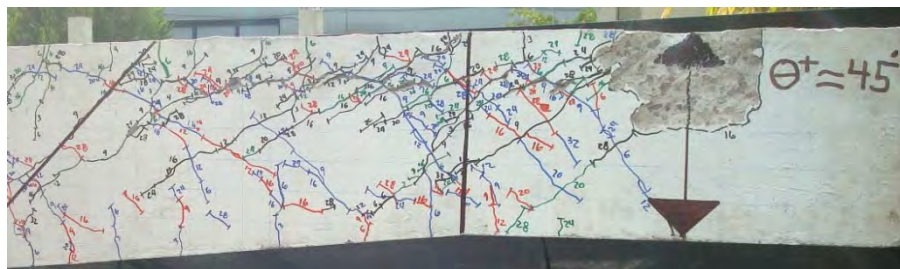


Figura 6.15 Deformaciones en el refuerzo longitudinal y transversal de la columna (TASCV3α1-R1c)

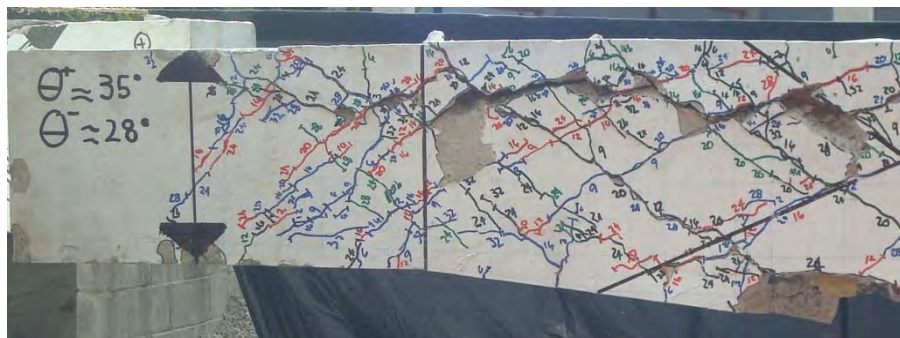
6.4 Elemento TASCV3α2-R1c

El espécimen TASCV3α2-R1c fue sometido a carga cíclica reversible, con el fin de determinar su comportamiento ante estas solicitaciones. La historia de desplazamiento se presenta en la figura 5.2. La aplicación y el sentido de la carga se realizaron conforme a lo descrito en el capítulo cuatro. El concreto empleado en la construcción del elemento TASCV3α2-R1c tenía una resistencia nominal a la compresión 215 kg/cm^2 (Apéndice A).

El patrón de daño observado fue similar en ambas direcciones de carga, pero no en ambas cartelas, ya que la cartela del lado izquierdo fue la que presentó más daño. El daño se caracterizó por la formación de grietas inclinadas en la cartela de lado izquierdo con un ángulo de orientación de 35° en la dirección positiva y de 28° en la dirección negativa, como se muestra en la figura 6.16a. En la cartela del lado derecho se formaron grietas inclinadas, con un ángulo en la dirección positiva de 45° y en la dirección negativa no se tuvo una grieta inclinada principal relevante y, en consecuencia, no se tomó en cuenta (figura 6.16b). En general, las grietas se extendieron desde los puntos de aplicación de carga hacia el nudo viga-columna.



a) Cartela derecha



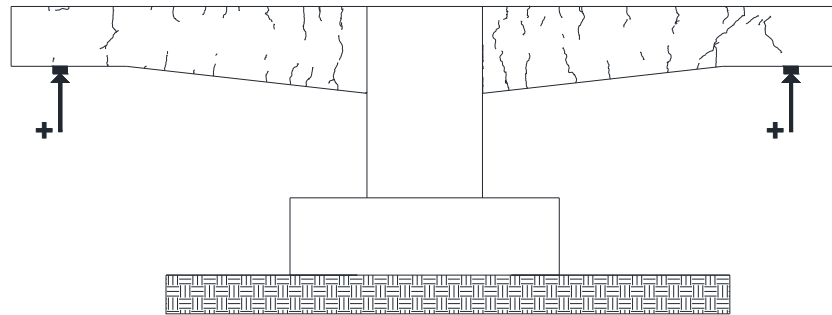
b) Cartela izquierda

Figura 6.16 Dirección y ángulo de grietas principales

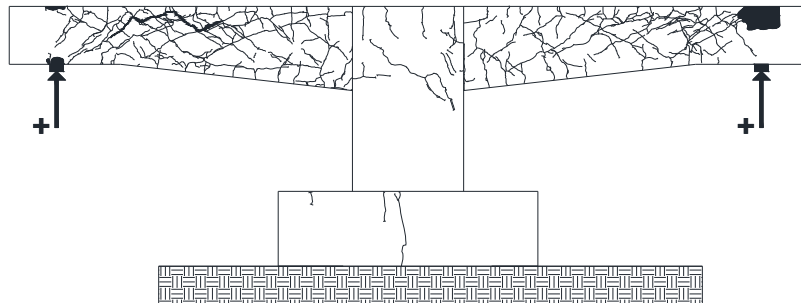
La aparición de grietas se propagó en ambas direcciones. La mayor anchura de grieta en la cartela izquierda fue de 4 mm, mientras que en la cartela derecha la anchura de grieta mayor fue de 1.25 mm. Además, la anchura de las grietas en ambas cartelas iba incrementando conforme se iba incrementando el desplazamiento, y se observó que las principales grietas correspondían al medio ciclo negativo. Durante la prueba se observaron también desconchamientos en los puntos de aplicación de carga; además, en la cartela izquierda se presentó desprendimiento del recubrimiento en ambas caras, mientras que en la cartela del lado derecho no se presentaron desprendimientos. La carga máxima resistida por el espécimen TASCV3α2-R1c en la cartela izquierda fue de +35.06 ton y en la cartelada derecha fue de +31.05 ton. La deflexión máxima en la cartela izquierda medida en el vértice de la unión de la trabe prismática y acartelada en la dirección positiva fue $\Delta = +33.16$ mm y en la dirección negativa fue $\Delta = -33.04$ mm. La deflexión máxima en la cartela derecha medida en el vértice (unión de la trabe prismática y acartelada) en la dirección positiva fue $\Delta = +34.38$ mm y en la dirección negativa fue $\Delta = -33.38$ mm. Las grietas asociadas a la falla del espécimen atravesaron todo su ancho, y en este caso se presentó en la cartela izquierda.

6.4.1 Evolución del daño

Se emplearon cuatro colores diferentes para identificar y marcar las grietas que se generaban durante el ensaye tal y como se explicó anteriormente en la sección 6.2.1, y en los picos de máxima deflexión en cada ciclo se identificó con el desplazamiento máximo objetivo de ese medio ciclo. En la figura 6.17 se presentan los agrietamientos registrados después del primer ciclo de cada desplazamiento de las deflexiones características (Δ_{agr} , Δ_u , Δ_{clps}).



a) Primer agrietamiento



b) Falla



c) Colapso

Figura 6.17 Evolución del agrietamiento

Durante el ensaye experimental, el primer indicio de daño fue la aparición de grietas diagonales que correspondieron al primer agrietamiento diagonal y que forman parte del ciclo de desplazamiento, $\Delta = 6 \text{ mm}$ ($\Delta_{agr} = 6.26 \text{ mm}$ y $V_{agr} = -9.27 \text{ ton}$); las grietas aparecieron en ambas cartelas. Al finalizar los ciclos correspondientes a $\Delta = 9 \text{ mm}$, se observó que aparecieron más grietas diagonales en ambas cartelas (figura 6.19b); además, se observó desconchamiento en el punto de aplicación de la carga en la cartela derecha.

En el ciclo negativo correspondiente al desplazamiento $\Delta = 12 \text{ mm}$, el ancho máximo en la grieta de la cartela del lado derecho era de 0.3 mm . Además, se observó ampliación del desconchamiento en el punto de aplicación de la carga en la cartela derecha y se presentó desprendimiento del recubrimiento en la parte inferior del nudo viga-columna correspondiente a la cartela izquierda y se observó que una grieta atravesó el strain gage de concreto ubicado en la cartelada de lado derecho. En los ciclos correspondientes al desplazamiento $\Delta = 16 \text{ mm}$ y $\Delta = 20 \text{ mm}$ se presentó una falla en el dispositivo de carga, el cual fue el desprendimiento del conector del muñón con la celda de carga como se muestra en la figura 6.18. El problema se resolvió colocando un nuevo conector y otra celda de carga; ésto no perjudicó el ensaye total del espécimen, sólo datos correspondientes a la celda que se ajustaron. En estos ciclos se observó grietas en ambas cartelas, con un ancho de grieta máximo de 0.6 mm en la cartela de lado izquierdo y de 0.8 mm en la cartela de lado derecho.



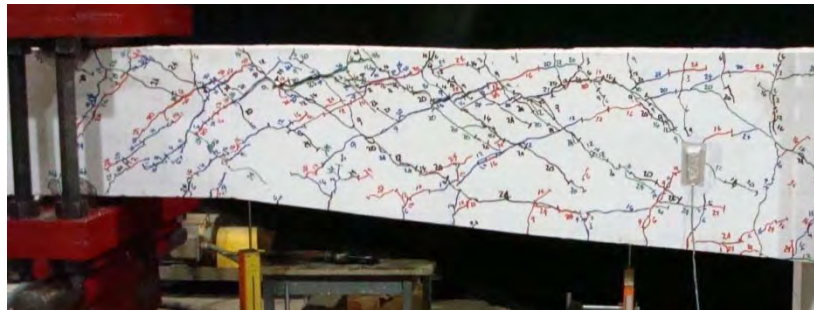
Figura 6.18 Detalle de falla de conector



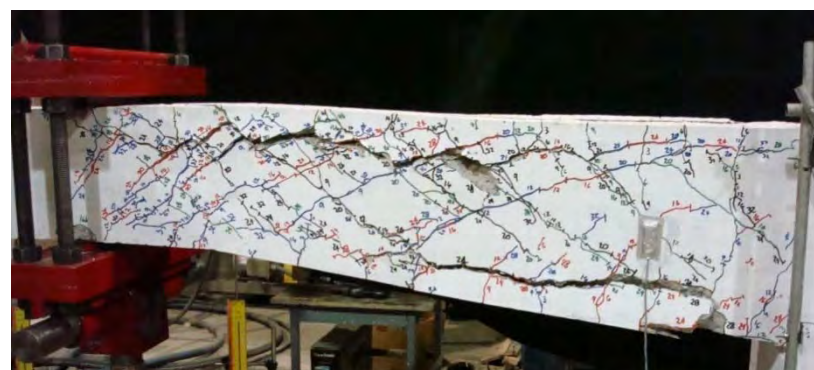
a) Ciclos correspondientes a $\Delta = 6$ mm



b) Ciclos correspondientes a $\Delta = 12$ mm



c) Ciclo $\Delta = 24$ mm, falla de la trabe

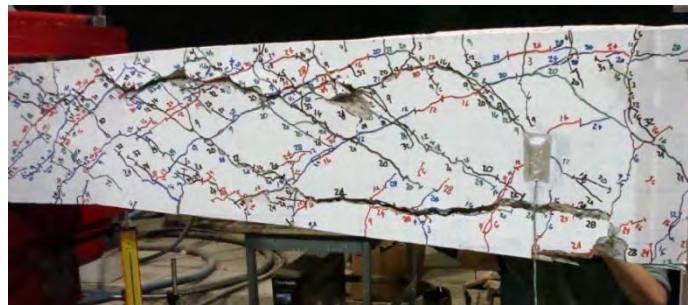


d) Ciclo $\Delta = 32$ mm, colapso de la trabe

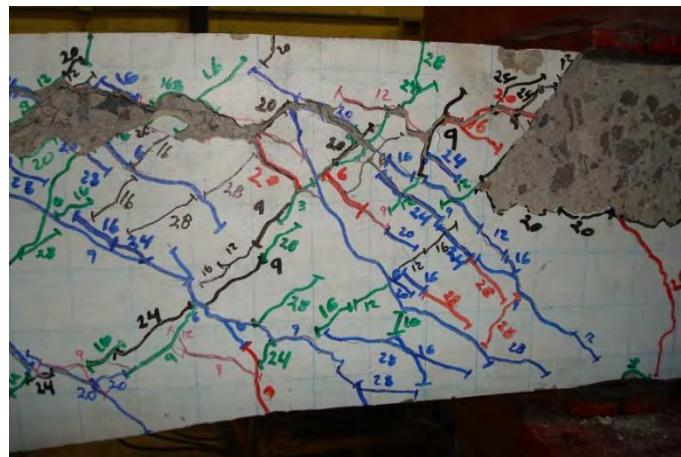
Figura 6.19 Elemento TASCv3α2-R1c durante el ensaye

En los ciclos correspondientes al desplazamiento $\Delta = 24$ mm se presentó la falla del espécimen en la cartela del lado izquierdo ($\Delta_u = -24.38$ mm y $V_u = 34.66$ ton) con un ancho de grieta máximo de 4mm (figura 6.19c); además, se observó desprendimiento del recubrimiento en la posterior de cartela izquierda.

El colapso de la trabe ocurrió al término del medio ciclo correspondiente a $\Delta = 32$ mm ($\Delta_{clps} = -33.04$ mm y $V_{clps} = 23.63$ ton), ya que se observó desprendimiento del recubrimiento en la parte superior e inferior de la cartela izquierda. También se observó que el espécimen ya se encontraba perdiendo capacidad de carga y fue donde se concluyó el ensaye. Cabe señalar que el espécimen no se llevó al colapso total, debido a que se reutilizará el acero.



a) Desprendimiento del recubrimiento en la parte superior e inferior de la cartela



b) Desconchamiento en la zona de aplicación de la carga

Figura 6.20 Detalle del daño en la cartela de lado izquierdo parte posterior

6.4.2 Comportamiento Carga-Deflexión

Los transductores que fueron monitoreados durante el ensaye fue el TD-2, correspondiente a la cartela derecha, y TI-2 correspondiente a la cartela izquierda, ambos colocados como se muestra en la figura 6.21.

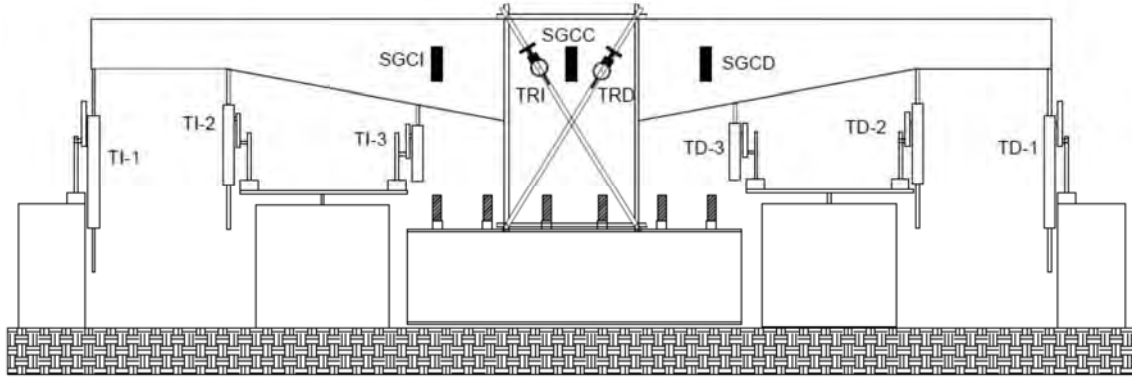


Figura 6.21 Identificación de transductores y strain gages de concreto

En las figuras 6.22 y 6.23 se muestran las curvas de histéresis obtenidas para cada cartela, donde la deflexión Δ es la que fue medida por los transductores de desplazamientos colocados a lo largo de las cartelas y los micrómetros que fueron colocados en el nodo viga-columna, como se menciona en el capítulo cuatro, y el cortante, V , es el que corresponde a la carga cíclica a la que fue sometida el espécimen en sus extremos.

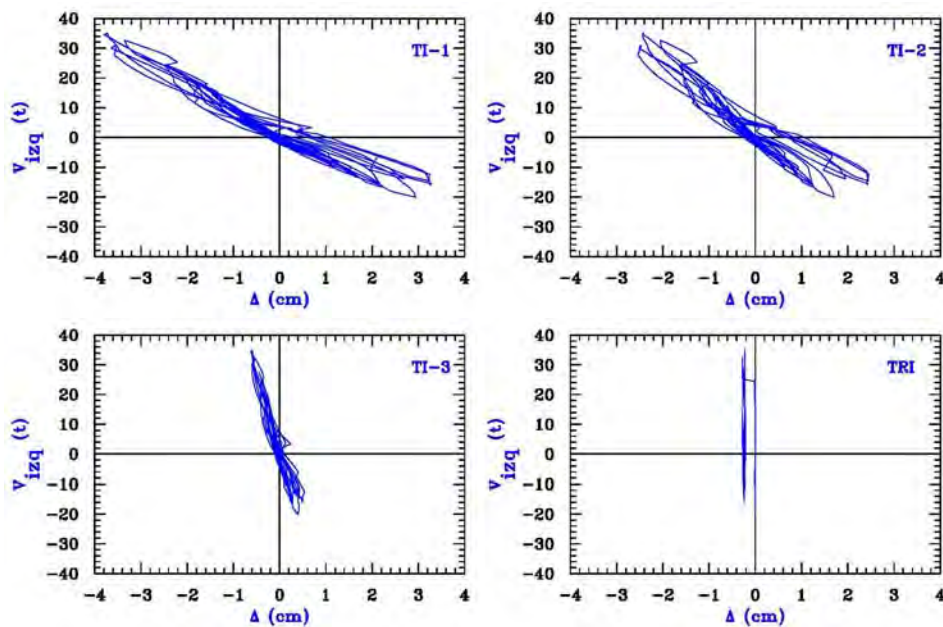


Figura 6.22 Curva de histéresis de cartela izquierda del espécimen TASCV3 α 2-R1c

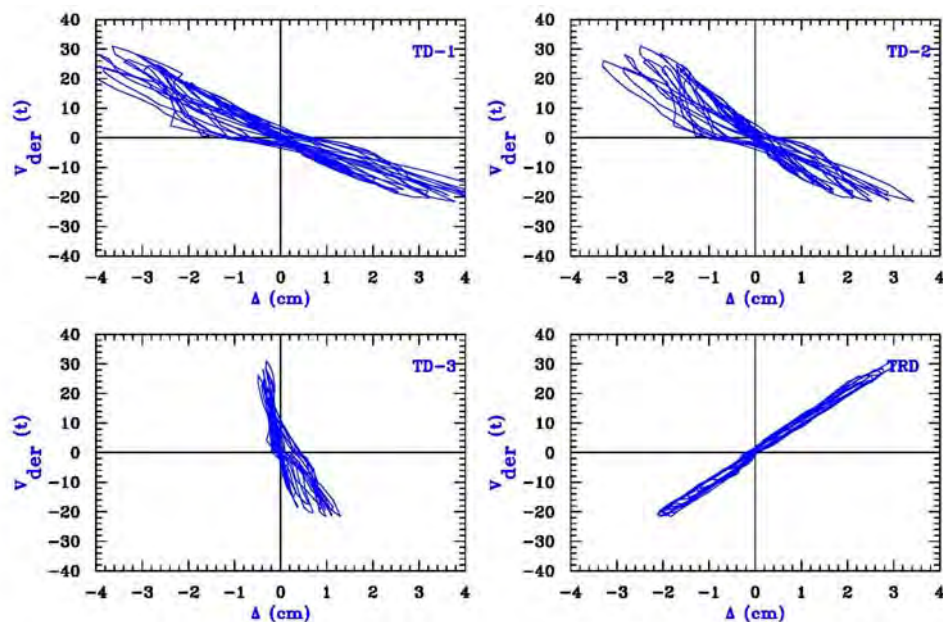


Figura 6.23 Curva de histéresis de cartela derecha del espécimen TASCV3α2-R1c

El cortante máximo resistido por la cartela del lado izquierdo fue de 35.06 ton y su desplazamiento máximo fue de 33.04 mm. Cabe mencionar que el cortante máximo resistido en la cartela derecha fue mayor que en la cartela izquierda, aunque en la cartela derecha no se presentó ningún daño relevante. El comportamiento fuerza cortante contra deflexión en todas las gráficas de las figuras 6.22 y 6.23 presentan un estrangulamiento en el origen; además, se aprecia una ligera asimetría en las gráficas, la cual se atribuye tanto al armado longitudinal como al peso propio y a la geometría de las cartelas. Además, en la figura 6.22 se observa que el transductor TRD tuvo un desplazamiento mayor, como consecuencia de las fallas que se presentaron en el dispositivo y también como consecuencia que el apoyo donde estaba colocado el transductor TRD fue ligeramente golpeado.

6.4.3 Análisis de la instrumentación interna

En esta sección se presenta la evaluación del comportamiento del elemento TASCV3α2-R1c con base en los registros de los strain gages adheridos al refuerzo transversal y longitudinal, tanto en las cartelas como en la columna. Además, se presenta el registro de los strain gages adheridos al concreto ubicados en las cartelas y el nodo viga-columna.

6.4.3.1 Refuerzo longitudinal en trabe

En la figura 6.24 se muestra, a manera de esquema, la identificación de la instrumentación interna en el refuerzo longitudinal del espécimen. En las figuras 6.25 y 6.26 se presenta el comportamiento carga-deformación de los deformímetros eléctricos adheridos al refuerzo

longitudinal superior (RS) e inferior (RI), como también al refuerzo longitudinal en el nodo viga–columna (RC), dichos dispositivos se dividen en grupos; los representativos para la cartela de lado izquierdo (I), y para la cartela de lado derecho (D).

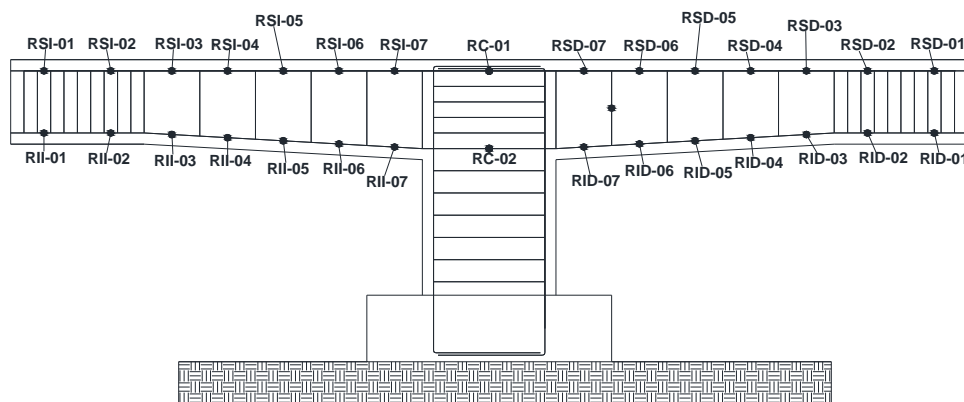


Figura 6.24 Identificación de strain gages en refuerzo longitudinal

En la figura 6.25 se observa un proceso evolutivo de deformación conforme la instrumentación se acerca al punto de aplicación de carga, donde los deformímetros que sufren fluencia son los de la barra del lecho superior (RSI-03, RSI-04, RSI-05 y RSI-06). Mientras tanto, en la cartela de lado derecho (figura 6.26) se observa un proceso evolutivo de deformación conforme la instrumentación se acerca al punto de aplicación de carga. Los deformímetros que experimentaron fluencia fueron: RID-05, RID-06, RSD-05, RSD-06, y RSD-07. Lamentablemente, algunos deformímetros se perdieron y su respuesta no pudo graficarse.

Además, se observa que debido a la carga ante la cual fue sometida el espécimen, el strain gage RC-01 adherido en el nudo viga-columna alcanzó su fluencia, lo cual corresponde a lo observado en el ensaye, aunque cabe señalar que no fue un daño severo.

Los niveles de deformación fueron un poco diferentes en ambos lados de las cartelas, ya que el lado que falló fue la cartela del lado izquierdo. Además, se registró la fluencia en los deformímetros del refuerzo superior del lado izquierdo, cercanos al punto de la aplicación de carga, lo cual se corrobora con el patrón de daño mostrado en la figura 6.20a, y con el desprendimiento del recubrimiento que se presentó en la parte superior e inferior de la cartela izquierda, así como el desconchamiento en el punto de aplicación de carga.

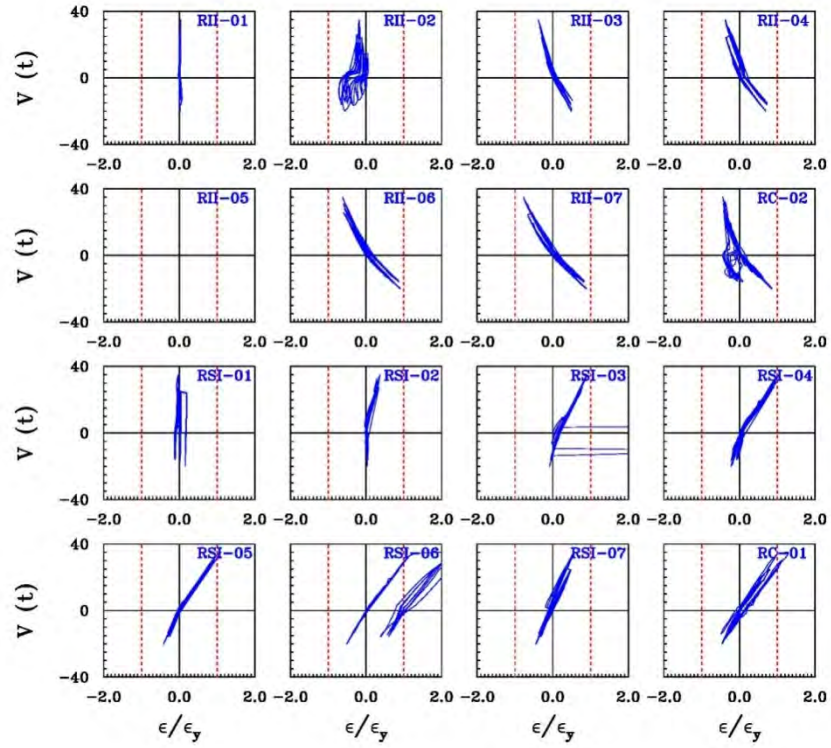


Figura 6.25 Deformaciones en el refuerzo longitudinal cartela izquierda (TASCV3α2-R1c)

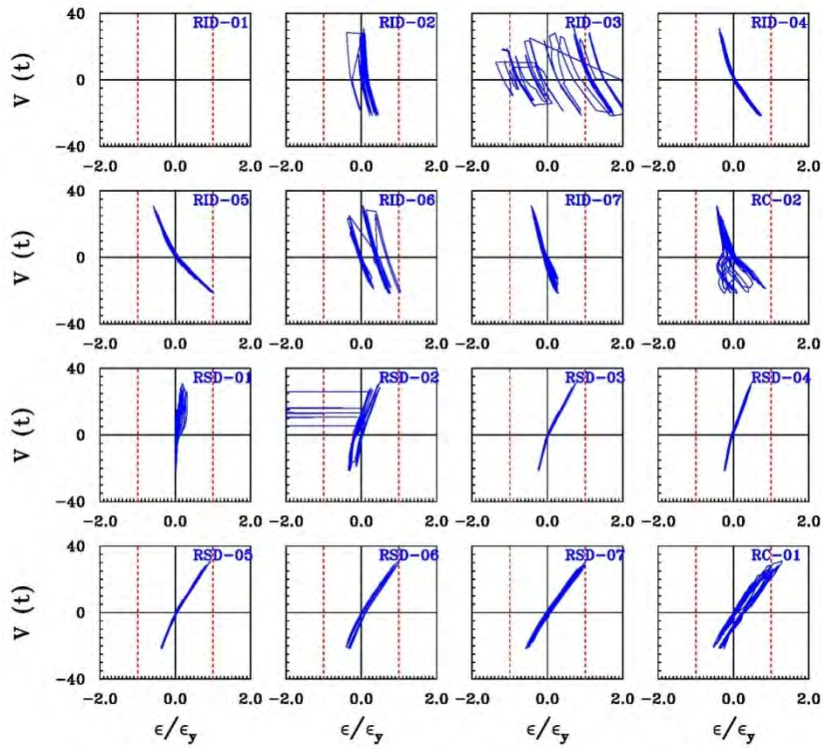


Figura 6.26 Deformaciones en el refuerzo longitudinal cartela derecha (TASCV3α2-R1c)

6.4.3.2 Refuerzo transversal

El comportamiento carga-deformación de los deformímetros eléctricos adheridos al refuerzo transversal (E) se presenta en la figura 6.28. Los deformímetros se dividieron en dos grupos; los representativos para la cartela de lado izquierdo (I), y para la cartela de lado derecho (D). A manera de esquema, la identificación de la instrumentación interna en el refuerzo transversal se presenta en la figura 6.27.

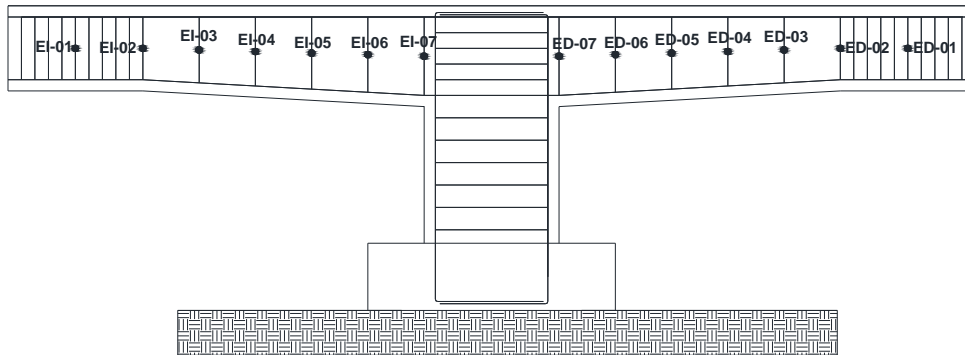


Figura 6.27 Identificación de strain gages en refuerzo transversal

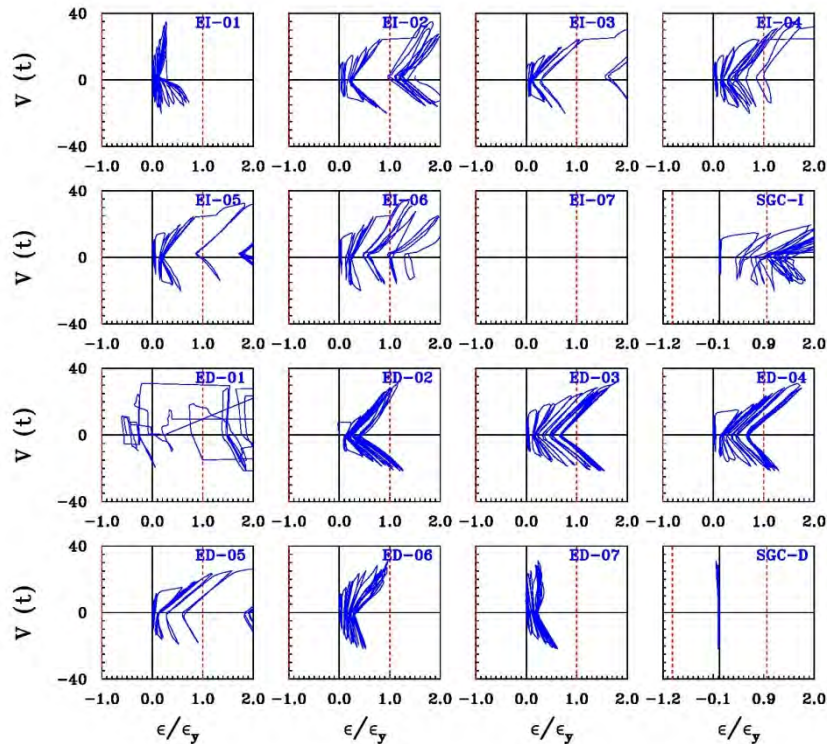


Figura 6.28 Deformaciones en el refuerzo transversal (TASCV3α2-R1c)

Las deformaciones en el refuerzo transversal presentan un proceso evolutivo conforme se acercan al punto de aplicación de carga. En la cartela de lado izquierdo, que es el lado donde se presentó la falla, se observa que los deformímetros ubicados en los estribos presentaron una deformación de fluencia al término de la prueba y fueron los que resistieron notablemente la aparición de grietas, descartando al deformímetro EI-01. En la cartela de lado derecho se observa que los deformímetros adheridos al refuerzo transversal que presentaron fluencia son: ED-02, ED-03, ED-04 y ED-05.

También, se observa que el strain gage de concreto (SGCI) de lado izquierdo falló debido a la presentación de grietas en esa zona.

6.4.3.3 Refuerzo longitudinal y transversal en la columna

En la figura 6.29 se muestra, a manera de esquema, la identificación de la instrumentación interna en el refuerzo longitudinal y transversal de la columna. En la figura 6.30 se presenta el comportamiento carga-deformación de los deformímetros eléctricos adheridos al refuerzo longitudinal de la columna del lado izquierdo (RCI) y del lado derecho (RCD), como también el refuerzo longitudinal en el nodo viga–columna y en la parte inferior de la columna (RC). Además, se presenta los deformímetros eléctricos adheridos al refuerzo transversal (EC).

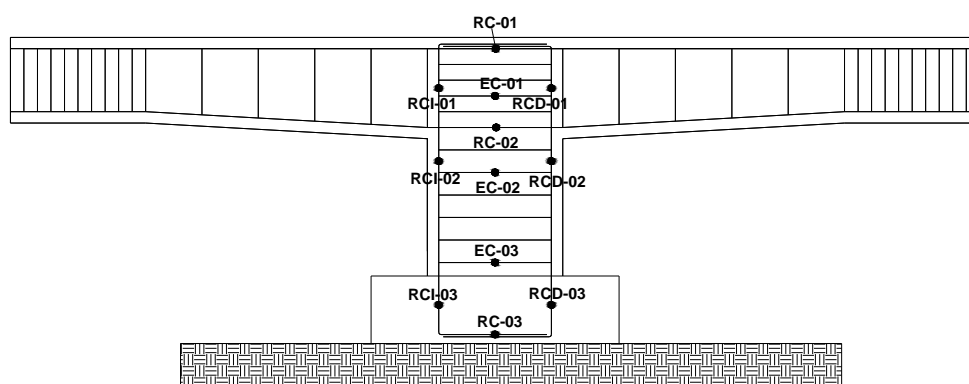


Figura 6.29 Identificación de strain gages en columna

Las carga P_c y V_c que se presentan en la figura 6.30 fueron obtenidas mediante el equilibrio de fuerzas, debido a que la carga cíclica a la que fue sometida el espécimen en sus extremos no se podía graficar directamente como en las figuras anteriores. En la figura 6.30 se observa que las deformaciones en el acero fueron relativamente mayores en comparación con el espécimen anterior, esto se debe a que se presenta leve daño en el nodo viga-columna. Lamentablemente, algunos de los deformímetros en la columna se perdieron o se despegaron, y su respuesta no pudo graficarse.

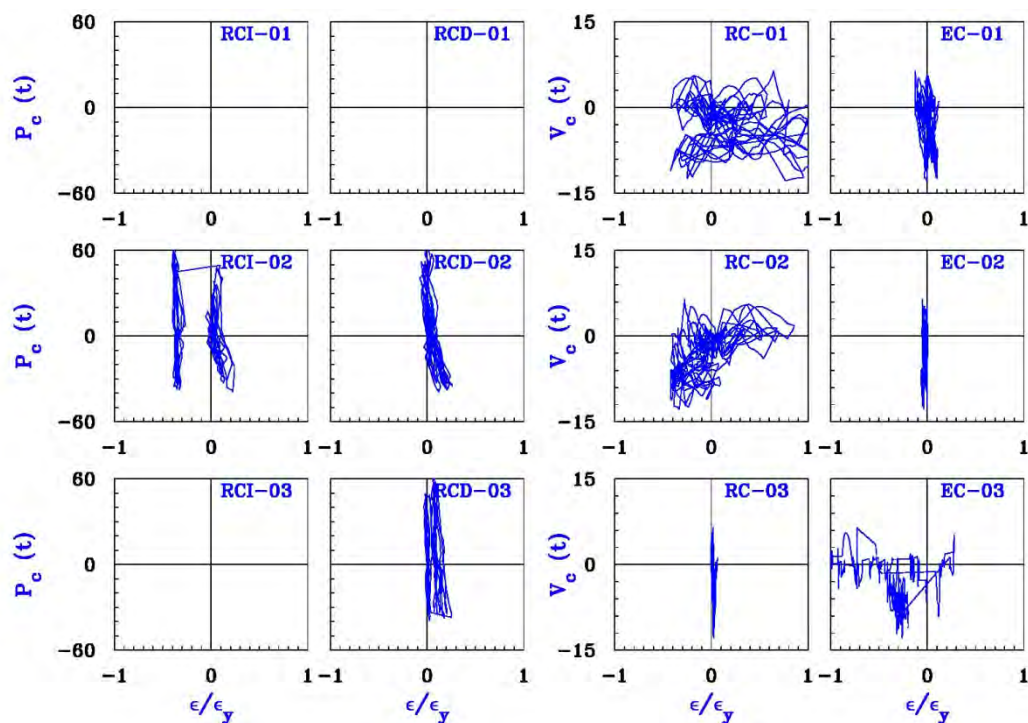
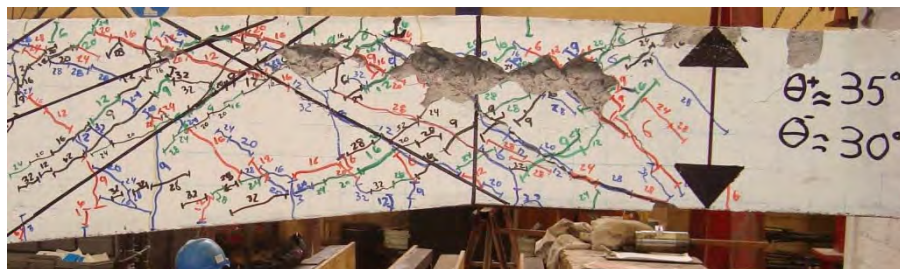


Figura 6.30 Deformaciones en el refuerzo longitudinal y transversal de la columna (TASCV3α2-R1c)

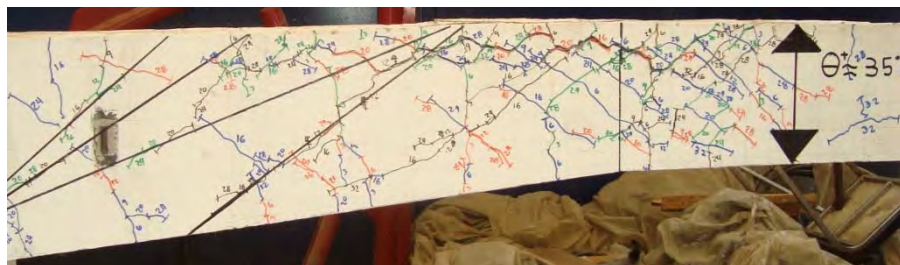
6.5 Elemento TASCV3α3-R1c

El espécimen TASCV3α3-R1c fue sometido a carga cíclica reversible, con el fin de determinar su comportamiento ante estas solicitaciones. La historia de desplazamiento se presenta en la figura 5.2. La aplicación y el sentido de la carga se realizaron conforme a lo descrito en el capítulo cuatro. El concreto empleado en la construcción del elemento TASCV3α3-R1c tenía una resistencia nominal a la compresión 225 kg/cm² (Apéndice A).

El patrón de daño observado fue similar en ambas direcciones de carga, pero no en ambas cartelas, ya que la cartela del lado izquierdo fue la que presentó más daño. El daño se caracterizó por la formación de grietas inclinadas en la cartela de lado izquierdo con un ángulo de orientación de 35° en la dirección positiva y de 30° en la dirección negativa, como se muestra en la figura 6.31a. En la cartela del lado derecho se formaron grietas inclinadas, con un ángulo en la dirección positiva de 35° y en la dirección negativa no se tuvo una grieta inclinada principal relevante y, en consecuencia, no se tomó en cuenta (figura 6.31b). En general, las grietas se extendieron desde los puntos de aplicación de carga hacia el nudo viga-columna.



a) Cartela izquierda



b) Cartela derecha

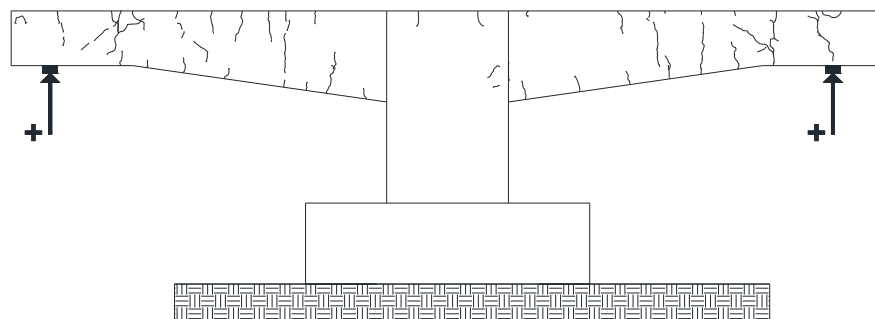
Figura 6.31 Dirección y ángulo de grietas principales

La aparición de grietas se propagó en ambas direcciones. La mayor anchura de grieta en la cartela izquierda fue de 4 mm, mientras que en la cartela derecha la anchura de grieta mayor fue de 7 mm. Además, la anchura de las grietas en ambas cartelas iba incrementando conforme se iba incrementando el desplazamiento, y se observó que las principales grietas correspondían al medio ciclo negativo. Durante la prueba se observaron también desconchamientos en los puntos de aplicación de carga; además, en la cartela izquierda se presentó desprendimiento de concreto en la zona del vértice, mientras que en la cartela del lado derecho se presentó desprendimiento de recubrimiento en la parte superior de la cartela cerca del punto de aplicación de la carga. La carga máxima resistida por el espécimen TASCV3 α 3-R1c en la cartela izquierda fue de +30.49 ton y en la cartelada derecha fue de +30.24 ton. La deflexión máxima en la cartela izquierda medida en el vértice en la dirección positiva fue $\Delta = +33.32$ mm y en la dirección negativa fue $\Delta = -32.84$ mm. La deflexión máxima en la cartela derecha medida en el vértice en la dirección positiva fue $\Delta = +32.58$ mm y en la dirección negativa fue $\Delta = -32.58$ mm. Las grietas asociadas a la falla del espécimen atravesaron todo su ancho, y en este caso se presentó en la cartela izquierda.

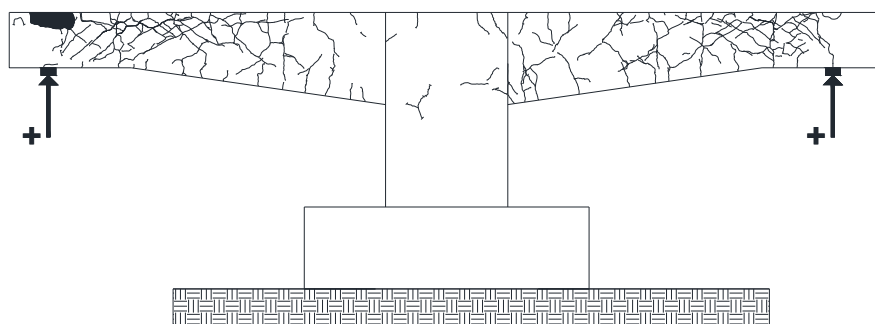
6.5.1 Evolución del daño

Se emplearon cuatro colores diferentes para identificar y marcar las grietas que se generaban durante el ensaye tal y como se explicó anteriormente en la sección 6.2.1, y en los picos de máxima deflexión en cada ciclo se identificó con el desplazamiento máximo

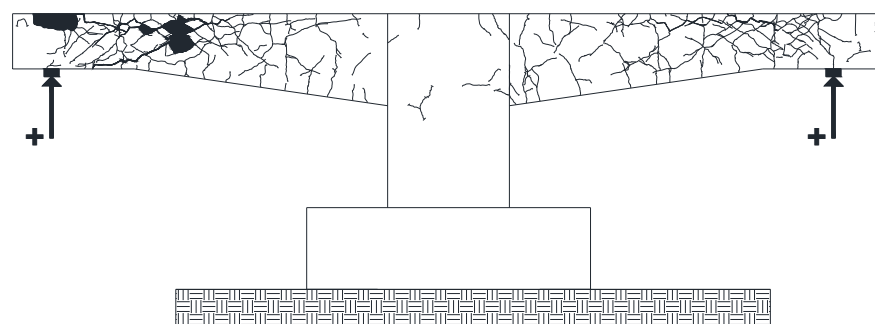
objetivo de ese medio ciclo. En la figura 6.32 se presentan los agrietamientos registrados después del primer ciclo de cada desplazamiento de las deflexiones características (Δ_{agr} , Δ_u , Δ_{clps}).



a) Primer agrietamiento



b) Falla



c) Colapso

Figura 6.32 Evolución del agrietamiento

Durante el ensaye experimental, el primer indicio de daño fue la aparición de grietas diagonales que correspondieron al primer agrietamiento diagonal y que forman parte del tercer medio ciclo de desplazamiento, $\Delta = 6$ mm ($\Delta_{agr} = -6.16$ mm y $V_{agr} = 10.65$ ton); las grietas aparecieron en ambas cartelas. Al finalizar los ciclos correspondientes a $\Delta = 12$

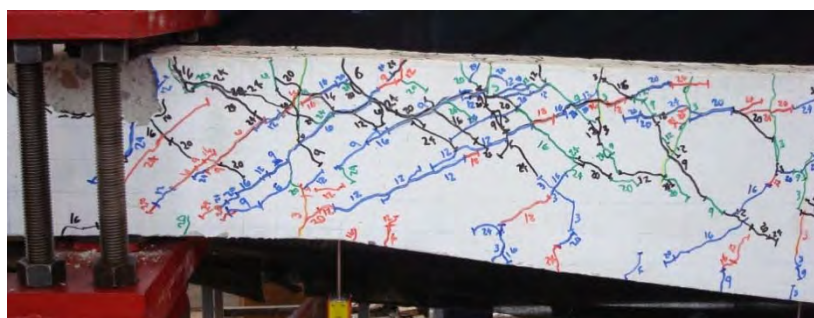
mm, se observó que las grietas observadas del ciclo anterior se extendieron y aparecieron grietas en el vértice de ambas cartelas (figura 6.33b).



a) Ciclos correspondientes a $\Delta = 6$ mm



b) Ciclos correspondientes a $\Delta = 12$ mm



c) Ciclo $\Delta = 24$ mm, falla de la trabe



d) Ciclo $\Delta = 32$ mm, colapso de la trabe

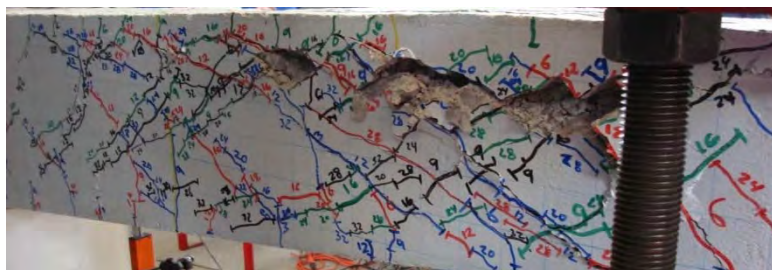
Figura 6.33 Elemento TASCV3α3-R1c durante el ensaye

En el ciclo negativo correspondiente al desplazamiento $\Delta = 16$ mm, el ancho máximo en la grieta de la cartela del lado izquierdo era de 0.5 mm. Además, se observó desconchamiento y desprendimiento en el punto de aplicación de la carga en la cartela izquierda. En la cartela de lado derecho, el ancho máximo de grieta fue de 0.15 mm; además, se presentó desprendimiento del soporte del marco de los transductores tipo reloj en la parte superior del nudo viga-columna. En el primer ciclo correspondiente al desplazamiento $\Delta = 24$ mm se presentó la falla del espécimen en la cartela del lado izquierdo ($\Delta_u = -24.32$ mm y $V_u = 30.36$ ton), con un ancho de grieta máximo de 4mm (figura 6.33c). Para los siguientes ciclos ($\Delta = 28$ mm), en la cartela de la izquierdo se observó desconchamiento en la zona del vértice y en el punto de aplicación de carga, mientras que en la parte posterior de la cartela de lado derecho se observó un ancho de grieta máximo de 7mm; además, se presentó desconchamiento cercano al punto de aplicación de carga mientras se estaba descargando.

El colapso de la trabe ocurrió al término del medio ciclo correspondiente a $\Delta = 32$ mm ($\Delta_{clps} = 33.32$ mm y $V_{clps} = -20.24$ ton), ya que se observó desprendimiento de concreto en la parte central de la cartela izquierda; además, se observó desconchamiento en el punto de aplicación de carga y se perdió adherencia en el concreto en lecho superior del refuerzo longitudinal (figura 6.34b). También se observó que el espécimen ya se encontraba perdiendo capacidad de carga y fue donde se concluyó el ensaye. Cabe señalar que el espécimen no se llevó al colapso total, debido a que se reutilizará el acero.



a) Desprendimiento y desconchamiento de concreto



b) Pérdida de adherencia en el concreto

Figura 6.34 Detalle del daño en la cartela de lado izquierdo

6.5.2 Comportamiento Carga-Deflexión

Los transductores que fueron monitoreados durante el ensaye fue el TD-2, correspondiente a la cartela derecha, y TI-2 correspondiente a la cartela izquierda, ambos colocados como se muestra en la figura 6.35.

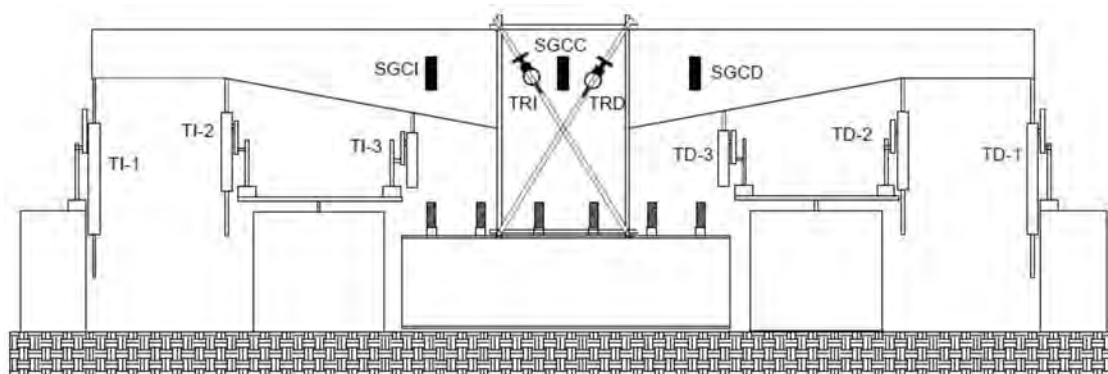


Figura 6.35 Identificación de transductores y strain gages de concreto

En las figuras 6.36 y 6.37 se muestran las curvas de histéresis obtenidas para cada cartela, donde la deflexión Δ es la que fue medida por los transductores de desplazamientos colocados a lo largo de las cartelas y los micrómetros que fueron colocados en el nodo viga-columna, como se menciona en el capítulo cuatro, y el cortante, V , es el que corresponde a la carga cíclica a la que fue sometida el espécimen en sus extremos.

El cortante máximo resistido por la cartela del lado izquierdo fue de 30.49 ton y su desplazamiento máximo fue de 33.32 mm. Cabe mencionar que el cortante máximo resistido en la cartela derecha fue ligeramente similar que en la cartela izquierda. El comportamiento fuerza cortante contra deflexión en todas las gráficas de las figuras 6.36 y 6.37 presentan un estrangulamiento en el origen. Además, se aprecia una ligera asimetría en las gráficas, la cual se atribuye tanto al armado longitudinal como al peso propio y a la geometría de las cartelas.

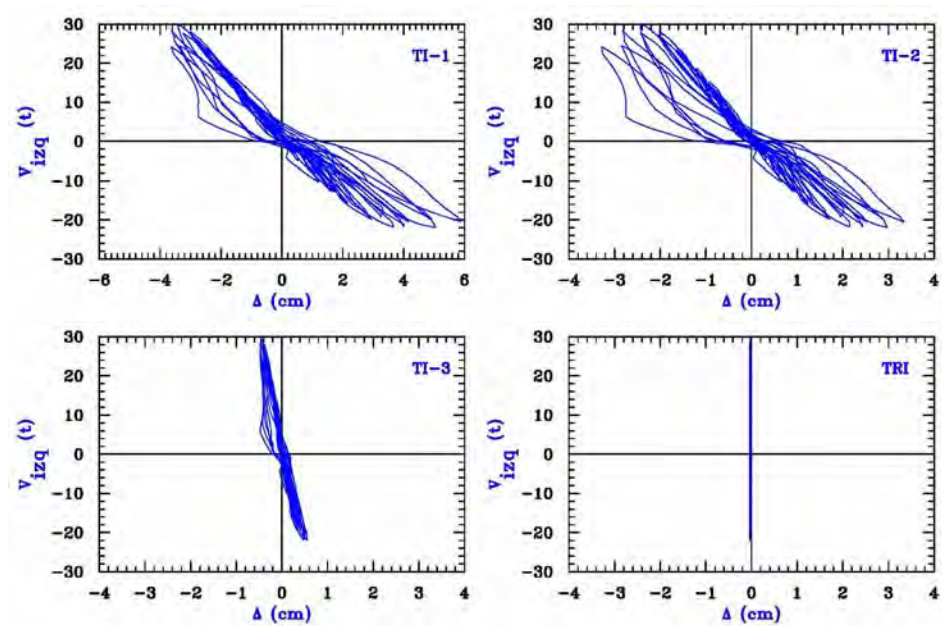


Figura 6.36 Curva de histéresis de cartela izquierda del espécimen TASCV3α3-R1c

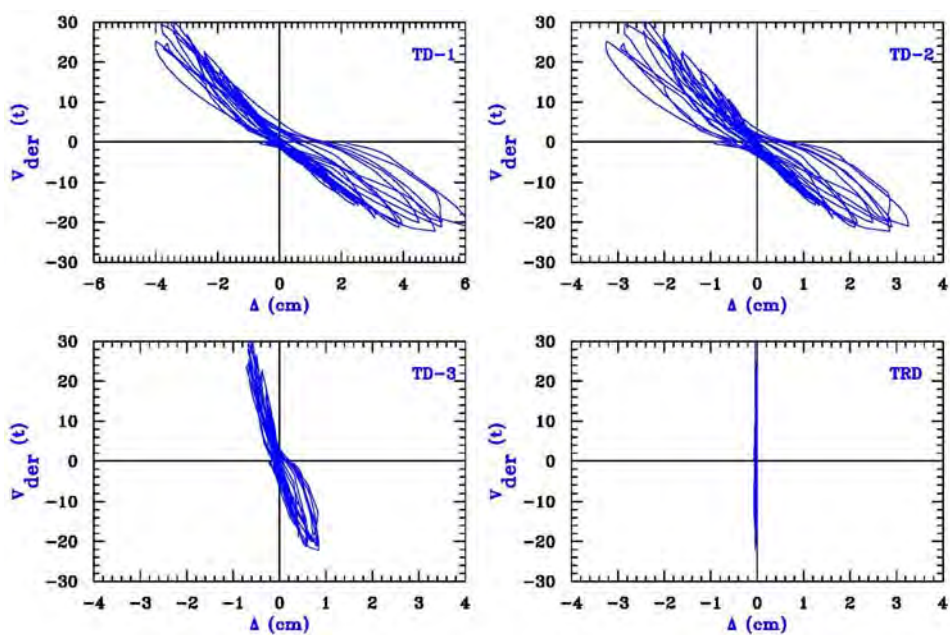


Figura 6.37 Curva de histéresis de cartela derecha del espécimen TASCV3α3-R1c

6.5.3 Análisis de la instrumentación interna

En esta sección se presenta la evaluación del comportamiento del elemento TASCV3 α 3-R1c con base en los registros de los strain gages adheridos al refuerzo transversal y longitudinal, tanto en las cartelas como en la columna. Además, se presenta el registro de los strain gages adheridos al concreto ubicados en las cartelas y el nodo viga-columna.

6.5.3.1 Refuerzo longitudinal en trabe

En la figura 6.38 se muestra, a manera de esquema, la identificación de la instrumentación interna en el refuerzo longitudinal del espécimen. En las figuras 6.39 y 6.40 se presenta el comportamiento carga-deformación de los deformímetros eléctricos adheridos al refuerzo longitudinal superior (RS) e inferior (RI), como también al refuerzo longitudinal en el nodo viga-columna (RC), dichos dispositivos se dividen en grupos; los representativos para la cartela de lado izquierdo (I), y para la cartela de lado derecho (D).

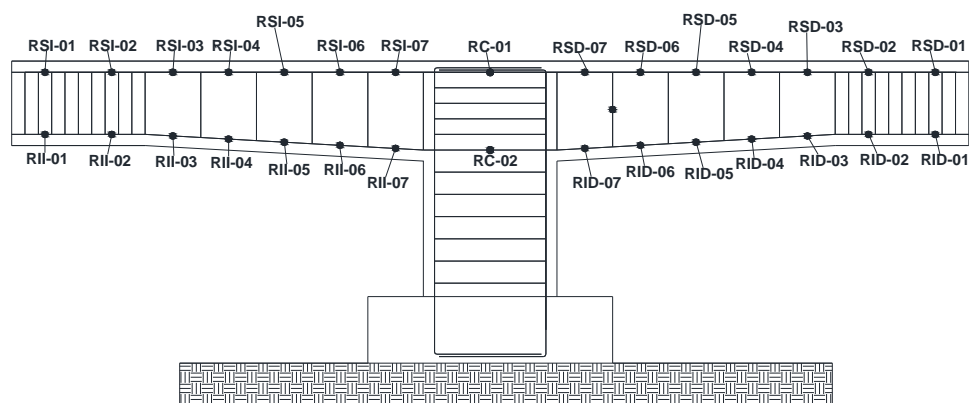


Figura 6.38 Identificación de strain gages en refuerzo longitudinal

En la figura 6.39 se observa un proceso evolutivo de deformación conforme la instrumentación se acerca al nudo viga-columna, donde los deformímetros que experimentaron fluencia fueron: RII-02, RII-03 RII-05, RII-07, RSI-02, RSI-06 y RSI-07. Mientras tanto, en la cartela de lado derecho (figura 6.40) se observa un proceso evolutivo de deformación conforme la instrumentación se acerca al nudo viga-columna. Los deformímetros que experimentan fluencia fueron: RID-05, RID-06, RID-07, RSD-06, y RSD-07. Lamentablemente, algunos deformímetros se perdieron y su respuesta no pudo graficarse.

Además, se observa que debido a la carga ante la cual fue sometida el espécimen, el deformímetro RC-01 adherido al lecho superior del refuerzo longitudinal en el nudo viga-

columna alcanzó su fluencia, lo que se corrobora con lo observado durante el ensaye, debido a que se presenta un daño leve en la zona del nudo viga columna.

Los niveles de deformación fueron ligeramente diferentes en ambos lados de las cartelas, ya que el lado que falló fue la cartela del lado izquierdo. Se registró la fluencia en los deformímetros de ambos lechos del refuerzo longitudinal del lado izquierdo, cercanos al punto de la aplicación de carga y al vértice, lo cual se corrobora con el patrón de daño mostrado en la figura 6.34, y con el desprendimiento de concreto que se presentó en la parte superior en ambas caras de la cartela izquierda, así como el desconchamiento en el punto de aplicación de carga.

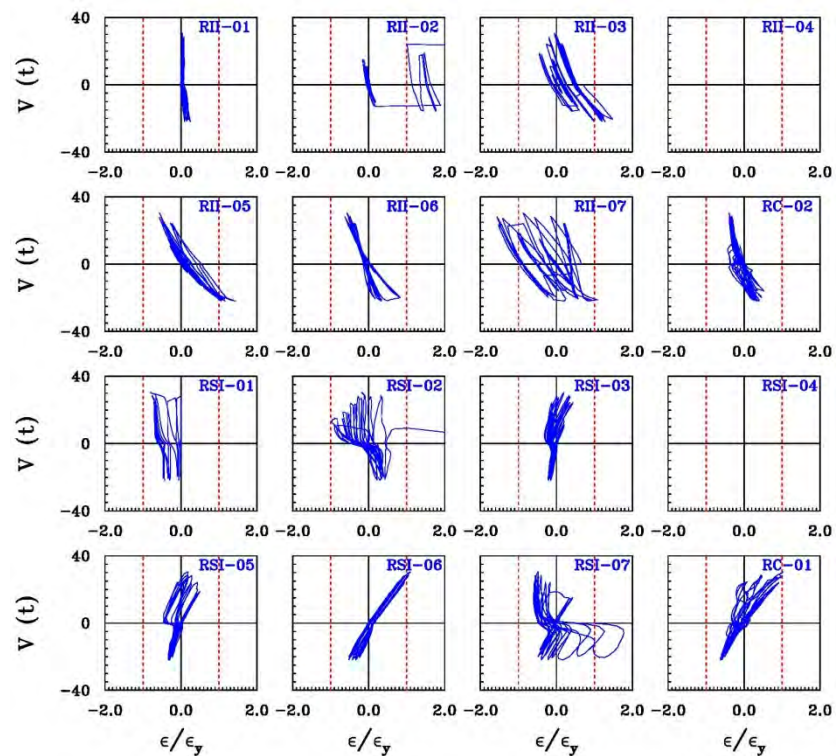


Figura 6.39 Deformaciones en el refuerzo longitudinal cartela izquierda (TASCV3α3-R1c)

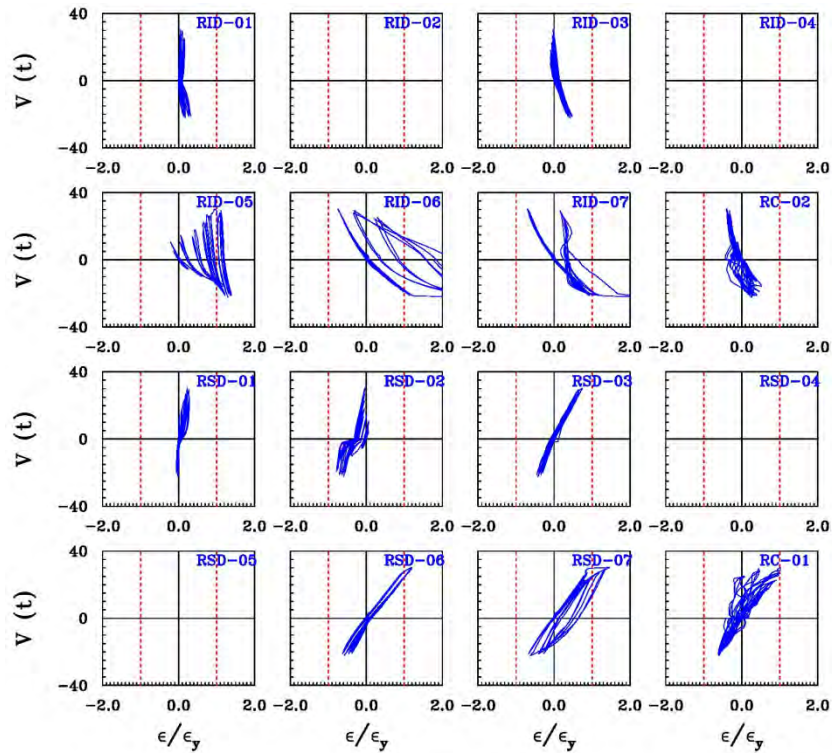


Figura 6.40 Deformaciones en el refuerzo longitudinal cartela derecha (TASCV3α3-R1c)

6.5.3.2 Refuerzo transversal

A manera de esquema, la identificación de la instrumentación interna en el refuerzo transversal se presenta en la figura 6.41. El comportamiento carga-deformación de los deformímetros eléctricos adheridos al refuerzo transversal (E) se presenta en la figura 6.42. Los deformímetros se dividieron en dos grupos; los representativos para la cartela de lado izquierdo (I), y para la cartela de lado derecho (D).

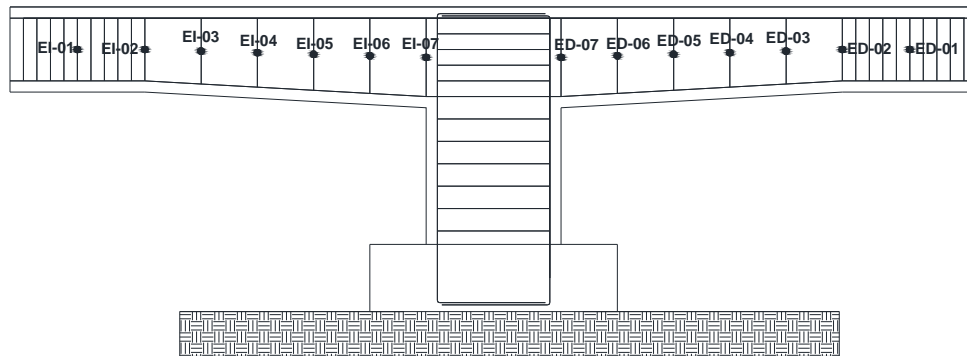


Figura 6.41 Identificación de strain gages en refuerzo transversal

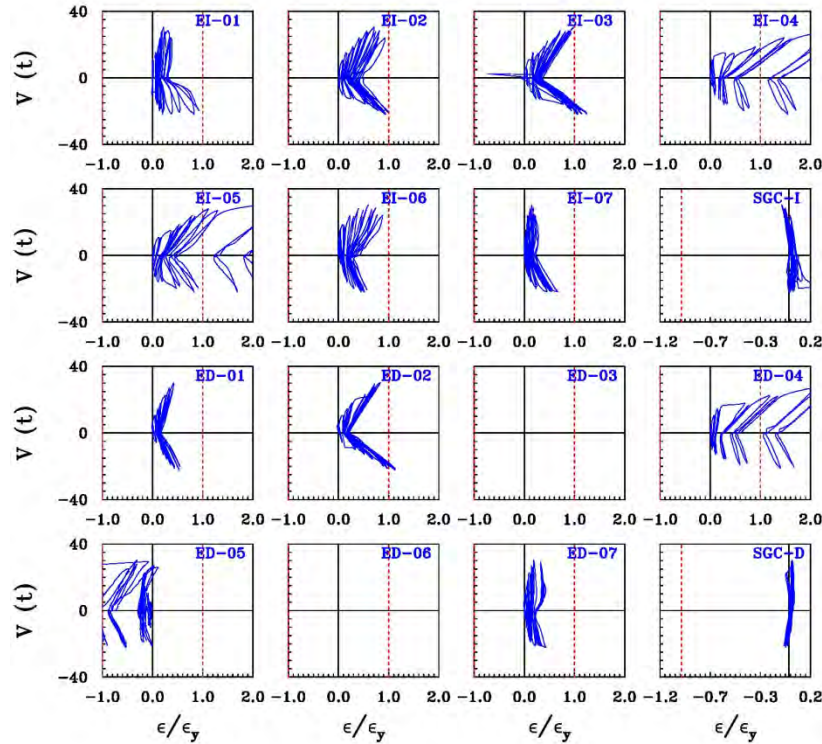


Figura 6.42 Deformaciones en el refuerzo transversal (TASCV3α3-R1c)

Las deformaciones en el refuerzo transversal presentan un proceso evolutivo conforme se acercan al punto de aplicación de carga. En la cartela de lado izquierdo, que es el lado donde se presentó la falla, se observa que los deformímetros EI-02, EI-03, EI-04, y EI-05 presentaron una deformación de fluencia al término de la prueba y fueron los que resistieron notablemente la aparición de grietas. En la cartela de lado derecho se observa que los deformímetros adheridos al refuerzo transversal que presentaron fluencia fueron: ED-02, ED-04 y ED-05.

También se observa que los strain gages de concreto de ambas cartelas no presentaron ningún daño debido a que la aparición de grietas se concentró cerca de la zona del vértice.

6.5.3.3 Refuerzo longitudinal y transversal en la columna

En la figura 6.43 se muestra, a manera de esquema, la identificación de la instrumentación interna en el refuerzo longitudinal y transversal de la columna. En la figura 6.44 se presenta el comportamiento carga-deformación de los deformímetros eléctricos adheridos al refuerzo longitudinal de la columna del lado izquierdo (RCI) y del lado derecho (RCD), como también el refuerzo longitudinal en el nodo viga–columna y en la parte inferior de la columna (RC). También se presenta los deformímetros eléctricos adheridos al refuerzo transversal (EC).

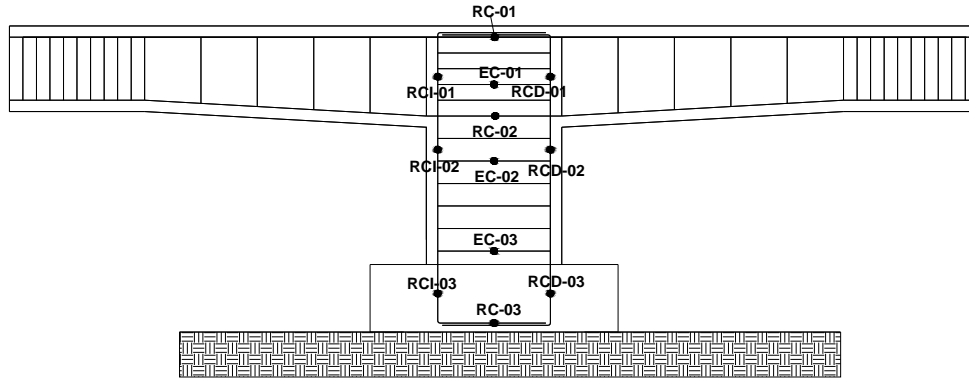


Figura 6.43 Identificación de strain gages en columna

Las carga P_c y V_c que se presentan en la figura 6.44 fueron obtenidas mediante el equilibrio de fuerzas, debido a que la carga cíclica a la que fue sometida el espécimen en sus extremos no se podía graficar directamente como en las figuras anteriores. En la figura 6.44 las deformaciones en el refuerzo longitudinal de la columna presentan un proceso evolutivo conforme se acercan al dado; además, se observa que las deformaciones fueron mínimas, esto se debe a que no se presenta daño relevante en el nodo viga-columna.

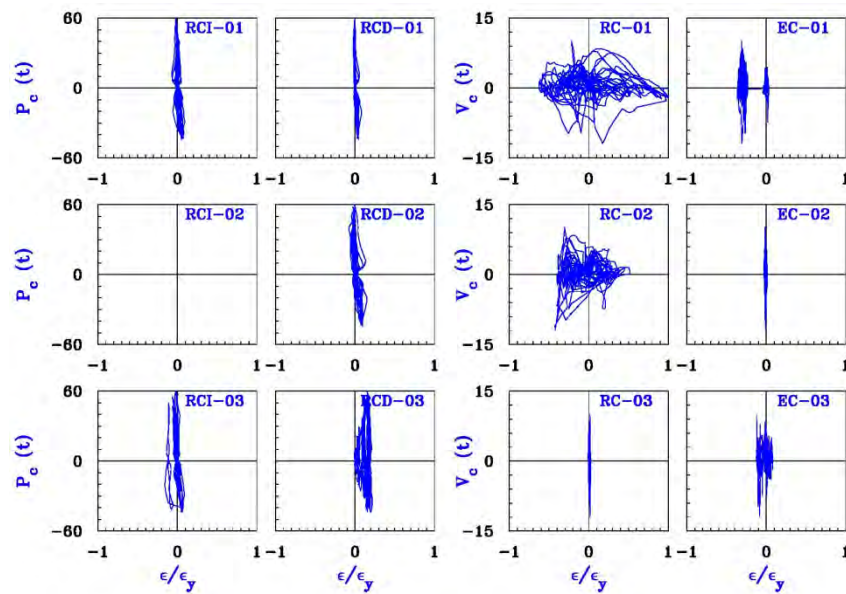
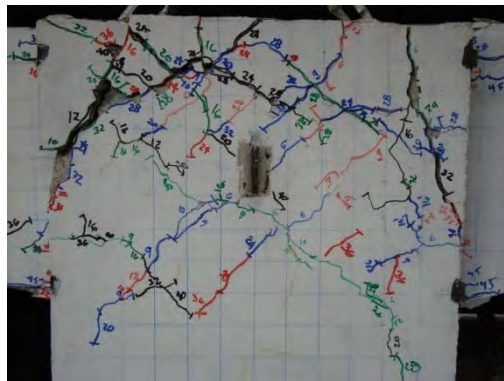


Figura 6.44 Deformaciones en el refuerzo longitudinal y transversal de la columna (TASCV3α3-R1c)

6.6 Elemento TASCV3α4-R1c

El espécimen TASCV3α4-R1c fue sometido a carga cíclica reversible, con el fin de determinar su comportamiento ante estas solicitaciones. La historia de desplazamiento se presenta en la figura 5.2. La aplicación y el sentido de la carga se realizaron conforme a lo descrito en el capítulo cuatro. El concreto empleado en la construcción del elemento TASCV3α4-R1c tenía una resistencia nominal a la compresión 220 kg/cm^2 (Apéndice A).

El patrón de daño observado fue similar en ambas direcciones de carga y en ambas cartelas. Cabe señalar que de acuerdo a como se aplicó la carga en el espécimen, la falla y el daño se presentó en el nudo viga-columna antes que se presentará la falla por cortante en las cartelas. El daño en el nudo se caracterizó por el desprendimiento de concreto en la parte superior (figura 6.45a). El daño que se presentó en ambas catelas se caracterizó por la formación de grietas inclinadas, pero no se tuvo una grieta inclinada principal relevante y, en consecuencia, no se tomó en cuenta (figura 6.45b). En general, las grietas se concentraron más en el nudo viga-columna.



a) Nudo viga-columna



b) Vista general del espécimen

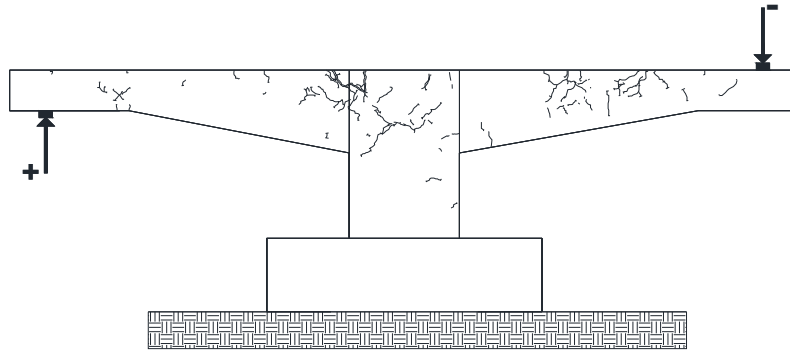
Figura 6.45 Dirección de grietas principales

La aparición de grietas se propagó en ambas direcciones. La mayor anchura de grieta en la en el nudo viga-columna fue de 5 mm, mientras que en la cartela derecha la anchura de grieta mayor fue de 0.2 mm. Durante la prueba se observaron también desconchamientos en los puntos de aplicación de carga y en el dado se presentó aplastamiento en el lado izquierdo y, como consecuencia, el lado derecho se levantó 1mm. La carga máxima resistida por el espécimen TASCV3α4-R1c en la cartela izquierda fue de +12.79 ton y en la cartelada derecha fue de +12.42 ton. La deflexión máxima en la cartela izquierda medida en el vértice en la dirección positiva fue $\Delta = +50.64\text{mm}$ y en la dirección negativa fue $\Delta = -46.04\text{mm}$. La deflexión máxima en la cartela derecha medida en el vértice en la dirección positiva fue $\Delta = +49.76\text{mm}$ y en la dirección negativa fue $\Delta = -45.78\text{mm}$. Las grietas asociadas a la falla se presentaron en el nudo viga-columna.

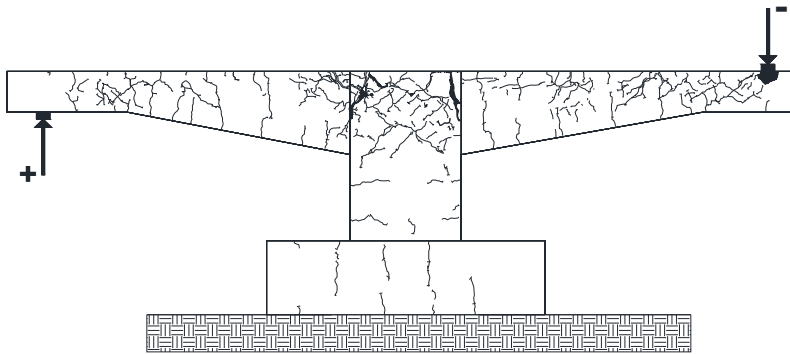
6.6.1 Evolución del daño

Se emplearon cuatro colores diferentes para identificar y marcar las grietas que se generaban durante el ensaye tal y como se explicó anteriormente en la sección 6.2.1, y en los picos de máxima deflexión en cada ciclo se identificó con el desplazamiento máximo objetivo de ese medio ciclo. En la figura 6.46 se presentan los agrietamientos registrados después del primer ciclo de cada desplazamiento de las deflexiones características (Δ_{agr} , Δ_u , Δ_{clps}).

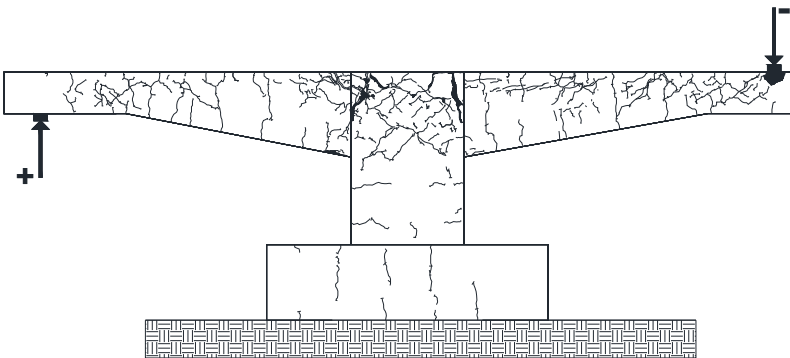
Durante el ensaye experimental, el primer indicio de daño fue la aparición de grietas diagonales que correspondieron al primer agrietamiento diagonal y que forman parte del tercer medio ciclo de desplazamiento, $\Delta = 12\text{ mm}$ ($\Delta_{agr} = -12.26\text{ mm}$ y $V_{agr} = 5.12\text{ ton}$); la grieta apareció en la cartela de lado derecho. Al finalizar los ciclos correspondientes a $\Delta = 16\text{ mm}$, se observó que aparecieron más grietas en ambas cartelas y en el nudo el ancho máximo de grieta fue de 0.4 mm (figura 6.47b).



a) Primer agrietamiento

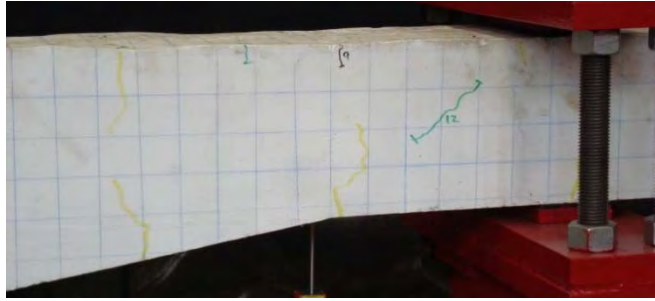


b) Falla

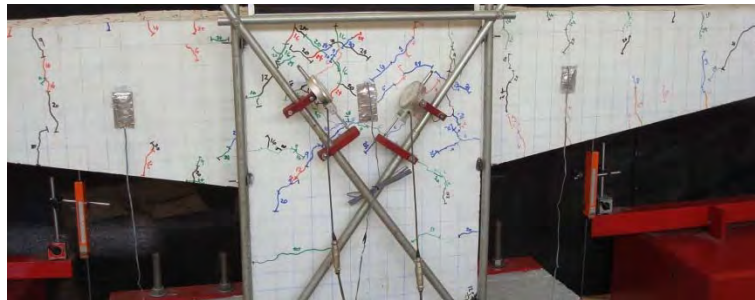


c) Colapso

Figura 6.46 Evolución del agrietamiento



a) Ciclos correspondientes a $\Delta = 12$ mm



b) Ciclos correspondientes a $\Delta = 24$ mm



c) Ciclo $\Delta = 36$ mm, falla de la trabe



d) Ciclo $\Delta = 45$ mm, colapso de la trabe

Figura 6.47 Elemento TASCV3 α 4-R1c durante el ensaye

En el ciclo negativo correspondiente al desplazamiento $\Delta = 24$ mm, se presentó aplastamiento en el lado izquierdo y en consecuencia, en el lado derecho se levantó 1mm. En el ciclo correspondiente al desplazamiento $\Delta = 36$ mm se presentó la falla del

especímen ($\Delta_u = -36.16$ mm y $V_u = 12.14$ ton) con un ancho de grieta máximo en el nudo de 5mm, además, en la cartela de lado derecho se presentó un ancho de grieta máximo de 0.2mm (figura 6.33c). Para los siguientes ciclos ($\Delta = 40$ mm) en el nudo viga columna en su parte superior se observó desprendimiento y pérdida de adherencia en el concreto (figura 6.48).

El colapso de la trabe ocurrió al término del medio ciclo correspondiente a $\Delta = 45$ mm ($\Delta_{clps} = -46.04$ mm y $V_{clps} = 11.27$ ton), ya que se presentó la falla del nudo por aplastamiento y flexión; A la vez, se observó desconchamiento en el punto de aplicación de carga. Por lo tanto, no se desarrolló la falla por cortante en la zona acartelada que se pretendía, como consecuencia de que la carga generó esfuerzos muy grandes de flexión en el nudo que no pudieron desarrollarse. La mayoría de las grietas que se desarrollaron en las cartelas son esencialmente de flexión, y su anchura no fue muy grande (0.2mm máximo). Se observó que el espécimen ya se encontraba perdiendo capacidad de carga, que esencialmente giraba la cartela en el nudo y fue donde se concluyó el ensaye.

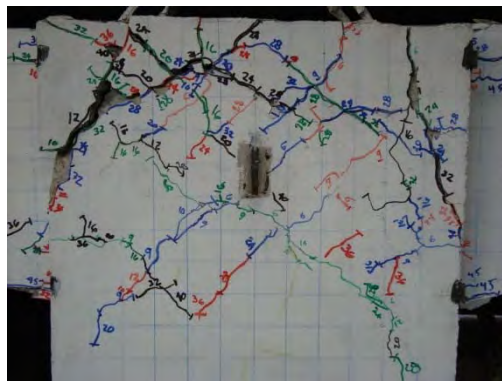


Figura 6.48 Desprendimiento y desconchamiento de concreto

Cabe señalar que el espécimen no se llevó al colapso total, debido a que se reutilizará el acero, pues se pretende instrumentar y ensayar nuevamente este espécimen ante el patrón de cargas que se empleó para los otros especímenes (por ejemplo, figura 4.18b), de manera de corroborar si la falla por cortante sí se puede presentar en la cartela toda vez que se garantice que los esfuerzos de flexión en el nudo viga-columna son reducidos (teóricamente nulos si las cargas se aplicaran en perfecta sincronía y las propiedades del concreto de ambas cartelas son idénticas). Es importante mencionar que éste fue el primer espécimen en ensayarse y, dada la falla que se presentó en el nudo, se decidió ensayar al resto de los especímenes con el patrón de la figura 4.18b, para garantizar que el nudo no falle (debido a que no está totalmente confinado), sino las cartelas.

6.6.2 Comportamiento Carga-Deflexión

Los transductores que fueron monitoreados durante el ensaye fue el TD-2, correspondiente a la cartela derecha, y TI-2 correspondiente a la cartela izquierda, ambos colocados como se muestra en la figura 6.49.

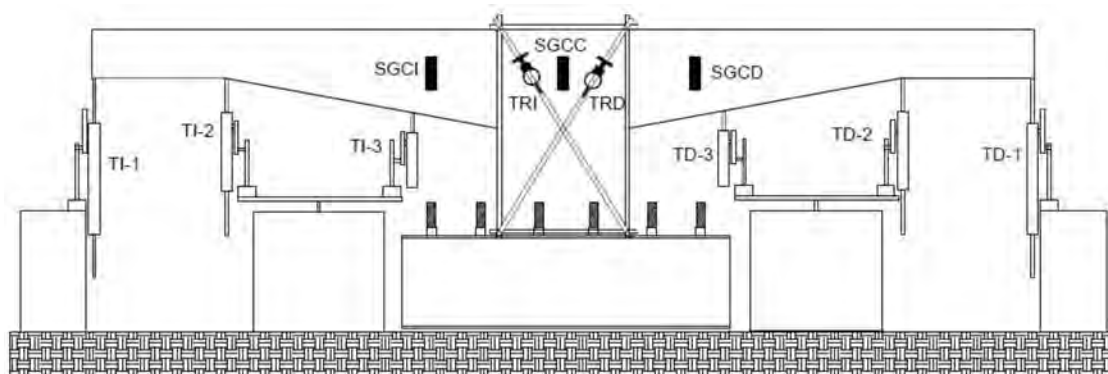


Figura 6.49 Identificación de transductores y strain gages de concreto

En las figuras 6.50 y 6.51 se muestran las curvas de histéresis obtenidas para cada cartela, donde la deflexión Δ es la que fue medida por los transductores de desplazamientos colocados a lo largo de las cartelas y los micrómetros que fueron colocados en el nodo viga-columna, como se menciona en el capítulo cuatro, y el cortante, V , es el que corresponde a la carga cíclica a la que fue sometida el espécimen en sus extremos.

El cortante máximo resistido por la cartela del lado izquierdo fue de 12.79 ton y su desplazamiento máximo fue de 50.64 mm. Cabe mencionar que el cortante máximo resistido en la cartela derecha fue similar que en la cartela izquierda. Esta fuerza cortante tan baja con respecto a la predicha en el diseño se debe a la falla prematura del nudo, pues los esfuerzos debido a la flexión fueron mayores que los anticipados en un nudo no confinado en su borde superior. El comportamiento fuerza cortante contra deflexión en todas las gráficas de las figuras 6.50 y 6.51 sólo muestran un ablandamiento o pérdida progresiva de la rigidez, como consecuencia del daño del nudo. Además se aprecia una ligera asimetría en las gráficas, la cual se atribuye tanto al armado longitudinal como al peso propio y a la geometría de las cartelas.

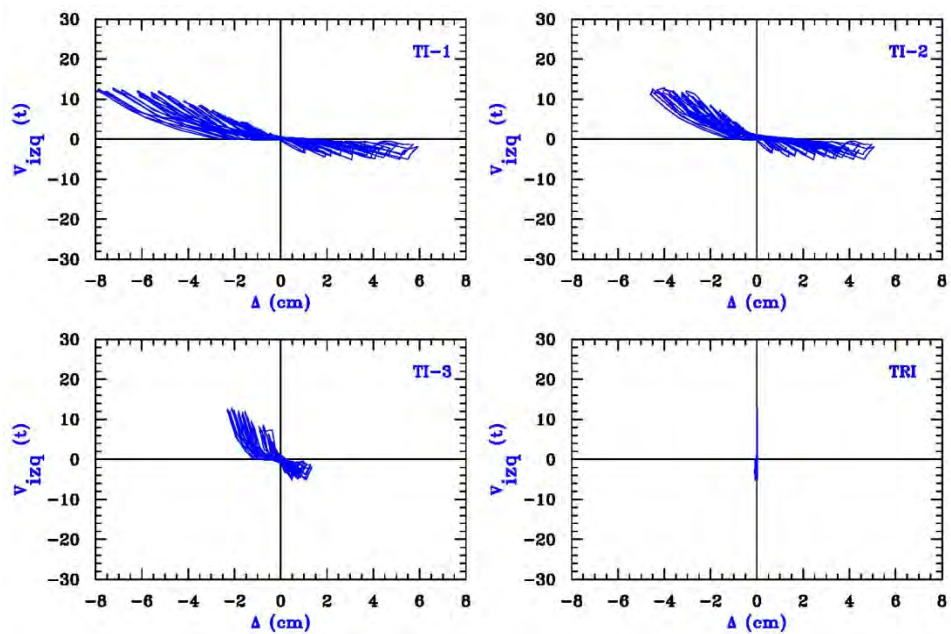


Figura 6.50 Curva de histéresis de cartela izquierda del espécimen TASC3 α 4-R1c

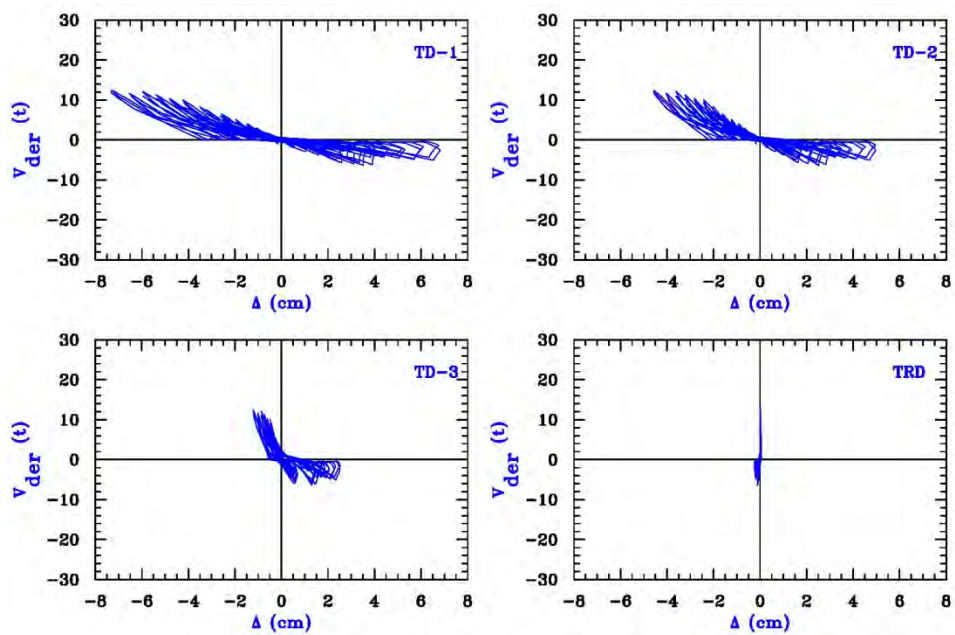


Figura 6.51 Curva de histéresis de cartela derecha del espécimen TASC3 α 4-R1c

6.6.3 Análisis de la instrumentación interna

En esta sección se presenta la evaluación del comportamiento del elemento TASCV3 α 4-R1c con base en los registros de los strain gages adheridos al refuerzo transversal y longitudinal, tanto en las cartelas como en la columna. Además, se presenta el registro de los strain gages adheridos al concreto ubicados en las cartelas y el nodo viga-columna.

6.6.3.1 Refuerzo longitudinal en trabe

En la figura 6.52 se muestra, a manera de esquema, la identificación de la instrumentación interna en el refuerzo longitudinal del espécimen. En las figuras 6.53 y 6.54 se presenta el comportamiento carga-deformación de los deformímetros eléctricos adheridos al refuerzo longitudinal superior (RS) e inferior (RI), como también al refuerzo longitudinal en el nodo viga-columna (RC), dichos dispositivos se dividen en grupos; los representativos para la cartela de lado izquierdo (I), y para la cartela de lado derecho (D).

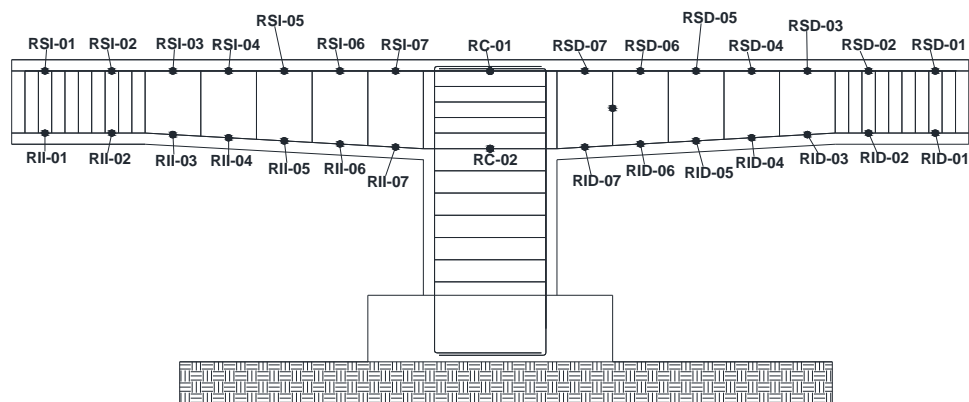


Figura 6.52 Identificación de strain gages en refuerzo longitudinal

En la figura 6.53 se observa un proceso evolutivo de deformación conforme la instrumentación se acerca al punto de aplicación de la carga, donde los deformímetros que experimentaron fluencia fueron: RII-01, RII-02, RII-04, RSI-04 y RSI-05. Mientras tanto, en la cartela de lado derecho (figura 6.54) se observa un proceso evolutivo de deformación conforme la instrumentación se acerca al punto de aplicación de la carga. Los deformímetros que experimentaron fluencia fueron: RID-01, RID-02, RID-05, RID-07, RSD-03, RSD-04, y RSD-07. Lamentablemente, algunos deformímetros se perdieron y su respuesta no pudo graficarse.

Además se observa que debido a la carga ante la cual fue sometida el espécimen, el deformímetro RC-02 adherido al lecho inferior del refuerzo longitudinal en el nudo viga-

columna alcanzó su fluencia, lo que se corrobora con lo observado durante el ensaye, debido a que se presenta un daño en la zona del nudo viga columna.

Los niveles de deformación fueron ligeramente diferentes en ambos lados de las cartelas, como se mencionó anteriormente, la falla se presentó en el nudo viga-columna. Además, se registró que hubo un mayor número de deformímetros que presentaron fluencia en el lecho inferior del refuerzo longitudinal de la trabe, cercanos al punto de la aplicación de carga y en la zona del vértice.

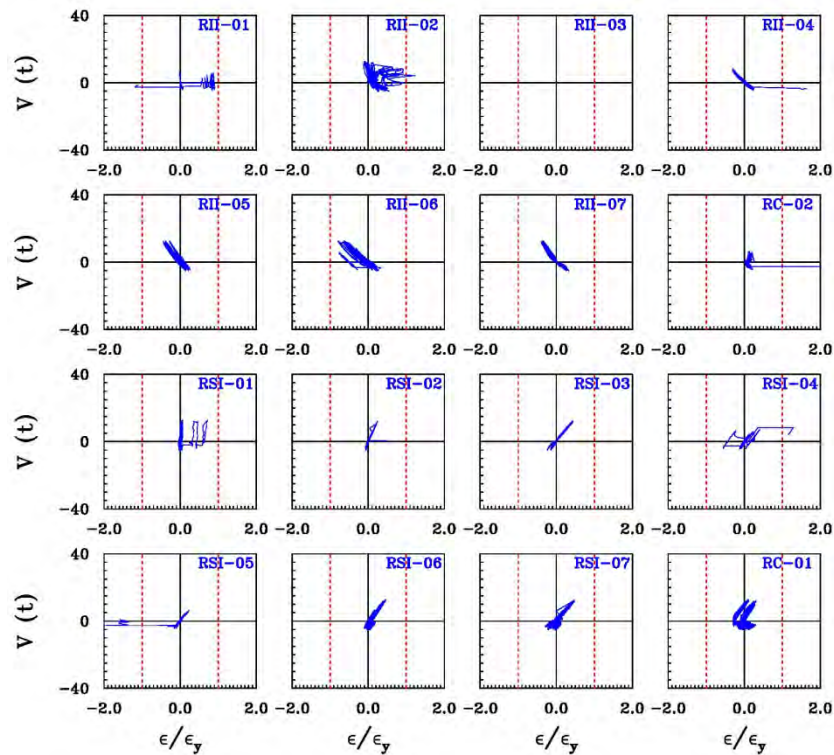


Figura 6.53 Deformaciones en el refuerzo longitudinal cartela izquierda (TASCV3α4-R1c)

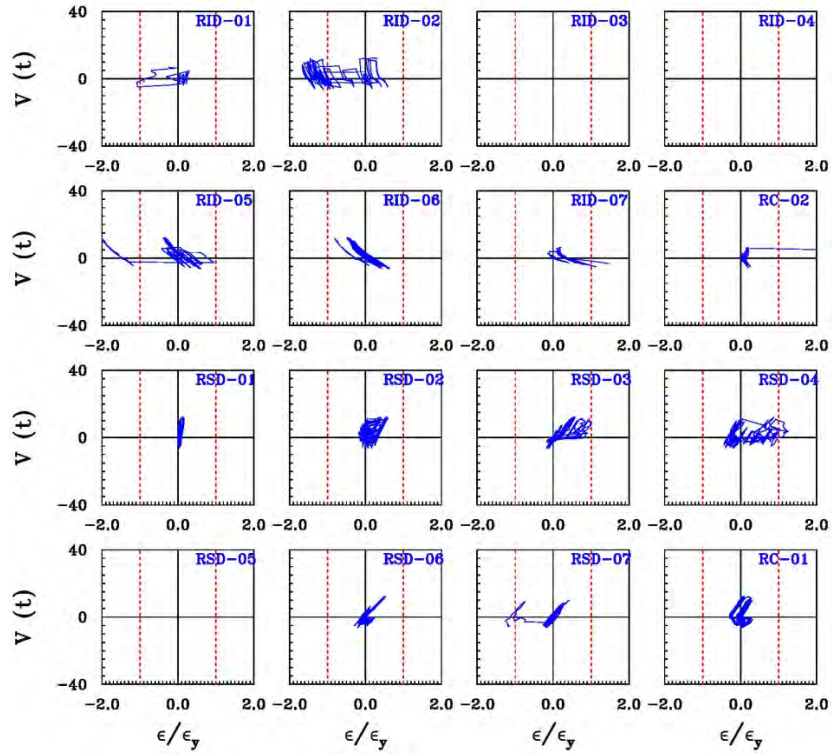


Figura 6.54 Deformaciones en el refuerzo longitudinal cartela derecha (TASCV4 α -R1c)

6.6.3.2 Refuerzo transversal

Los deformímetros se dividieron en dos grupos; los representativos para la cartela de lado izquierdo (I), y para la cartela de lado derecho (D). A manera de esquema, la identificación de la instrumentación interna en el refuerzo transversal se presenta en la figura 6.55. El comportamiento carga-deformación de los deformímetros eléctricos adheridos al refuerzo transversal (E) se presenta en la figura 6.56

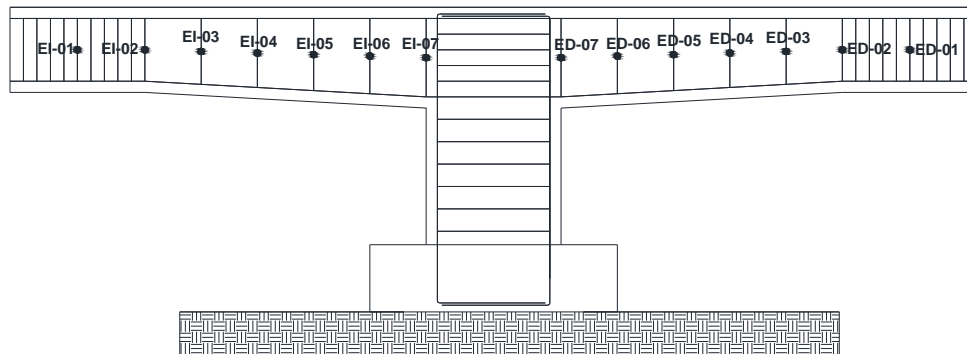


Figura 6.55 Identificación de strain gages en refuerzo transversal

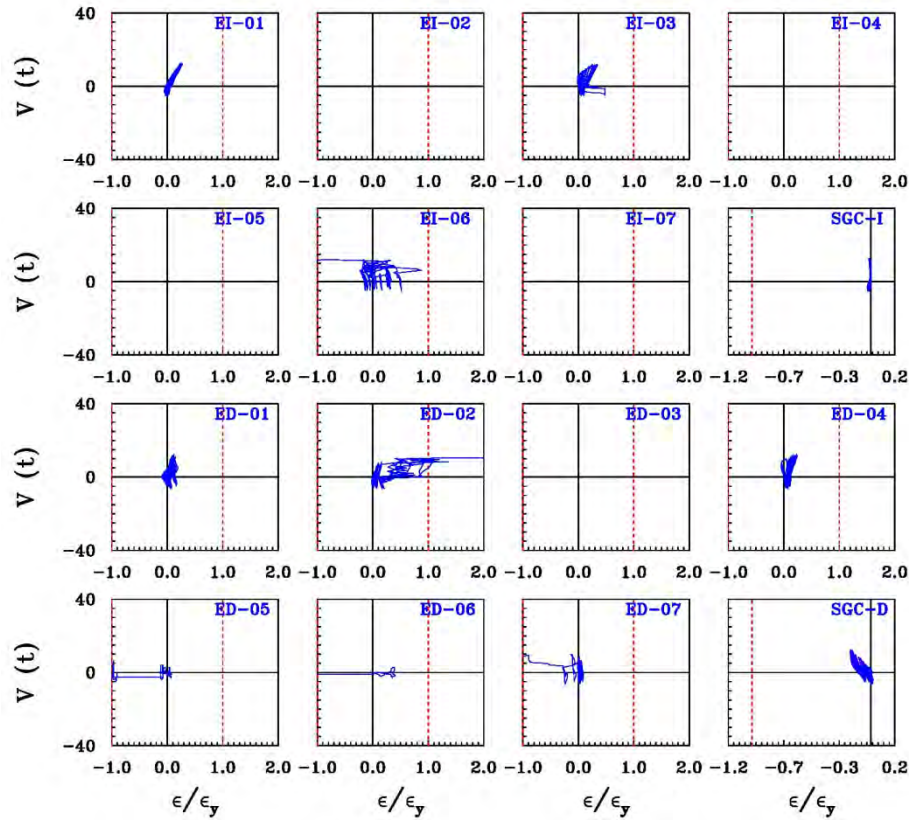


Figura 6.56 Deformaciones en el refuerzo transversal (TASCV3α4-R1c)

Las deformaciones en el refuerzo transversal presentan un proceso evolutivo conforme se acercan al punto de aplicación de carga. En la cartela de lado izquierdo, se observa que el deformímetro EI-06 presentó una deformación de fluencia al término de la prueba. En la cartela de lado derecho se observa que los deformímetros adheridos al refuerzo transversal que presentaron fluencia fueron: ED-02, ED-05 y ED-07. Estas fluencias tienen relación con el daño observado en esas zonas (figura 6.47). Lamentablemente, algunos deformímetros se perdieron y su respuesta no pudo graficarse.

También se observa que los strain gages de concreto de ambas cartelas no presentaron ningún daño, debido a que la aparición de grietas se concentró en el nudo viga-columna.

6.6.3.3 Refuerzo longitudinal y transversal en la columna

En la figura 6.57 se muestra, a manera de esquema, la identificación de la instrumentación interna en el refuerzo longitudinal y transversal de la columna. En la figura 6.58 se presenta el comportamiento carga-deformación de los deformímetros eléctricos adheridos al refuerzo longitudinal de la columna del lado izquierdo (RCI) y del lado derecho (RCD), como también el refuerzo longitudinal en el nodo viga-columna y en la

parte inferior de la columna (RC). Además, se presenta los deformímetros eléctricos adheridos al refuerzo transversal (EC).

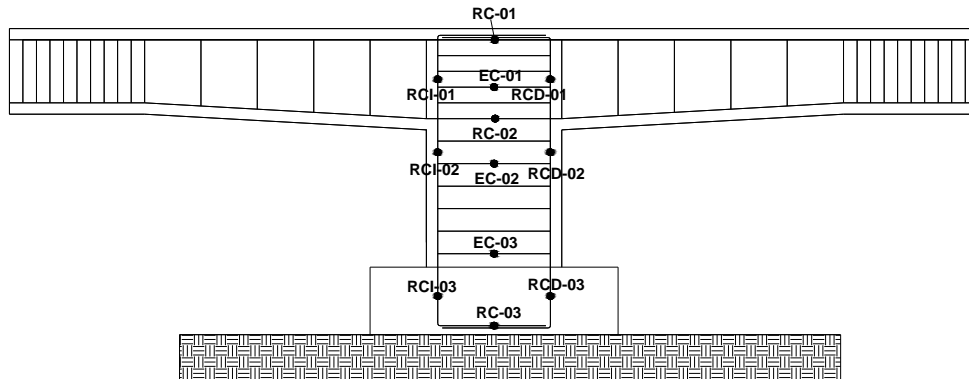


Figura 6.57 Identificación de strain gages en columna

Las carga P_c y V_c que se presentan en la figura 6.58 fueron obtenidas mediante el equilibrio de fuerzas, debido a que la carga cíclica a la que fue sometida el espécimen en sus extremos no se podía graficar directamente como en las figuras anteriores. En la figura 6.58 las deformaciones en el refuerzo longitudinal de la columna se presenta un proceso evolutivo conforme se acercan al dado, además, se observa que en los deformímetros se registraron deformaciones relevantes, incluso se observa que los deformímetro RC-02 y RCI-02 presentaron fluencia, esto se debe a que se presenta un daño relevante en el nodo viga-columna.

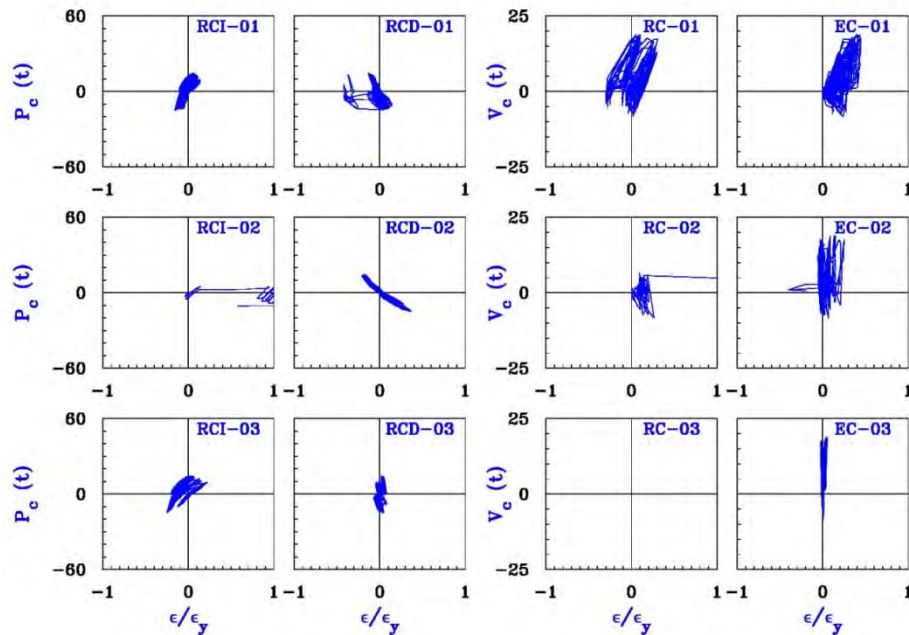
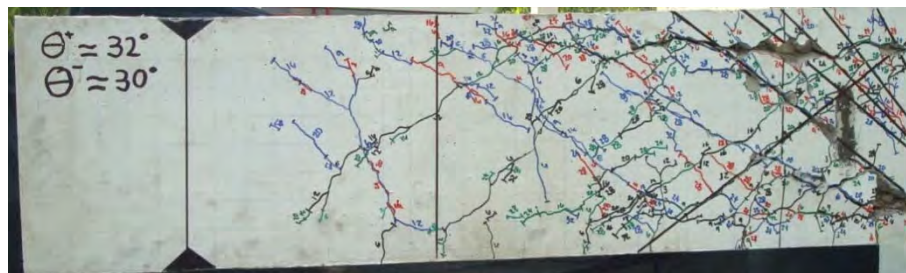


Figura 6.58 Deformaciones en el refuerzo longitudinal y transversal de la columna (TASC3V3α4-R1c)

6.7 Elemento TASCV3α0-R1c

El espécimen TASCV3α0-R1c es el que se tomó como referencia para la determinación de resultados a cortante durante estos ensayos experimentales. El espécimen fue sometido a carga cíclica reversible, con el fin de determinar su comportamiento ante estas solicitaciones. La historia de desplazamiento se presenta en la figura 5.2. La aplicación y el sentido de la carga se realizaron conforme a lo descrito en el capítulo cuatro (figura 4.18a). El concreto empleado en la construcción del elemento TASCV3α0-R1c tenía una resistencia nominal a la compresión 170 kg/cm² (Apéndice A).

El patrón de daño observado fue similar en ambas direcciones de carga, pero no en ambas cartelas, ya que la cartela del lado izquierdo fue la que presentó más daño. El daño se caracterizó por la formación de grietas inclinadas en la cartela de lado izquierdo con un ángulo de orientación de 32° en la dirección positiva y de 30° en la dirección negativa, como se muestra en la figura 6.59a. En la cartela del lado derecho se formaron grietas inclinadas, con un ángulo en la dirección positiva de 40° y en la dirección negativa no se tuvo una grieta inclinada principal relevante y, en consecuencia, no se tomó en cuenta (figura 6.59b). En general, las grietas se extendieron desde el nudo viga-columna hacia los puntos de aplicación de carga.



a) Cartela izquierda



b) Cartela derecha

Figura 6.59 Dirección y ángulo de grietas principales

La aparición de grietas se propagó en ambas direcciones. La mayor anchura de grieta en la cartela izquierda fue de 12 mm, mientras que en la cartela derecho la anchura de grieta mayor fue de 1 mm. Además, la anchura de las grietas en ambas cartelas iba incrementando conforme se iba incrementando el desplazamiento, y se observó que las principales grietas correspondían al medio ciclo negativo. Durante la prueba se observaron también desconchamientos en el apoyo del nudo viga-columna; además, en la cartela izquierda se presentó desprendimiento de concreto en la zona donde se presentaron las grietas principales, mientras que en la cartela del lado derecho en la parte posterior se presentó desconchamiento en el punto de aplicación de la carga y también se observó desconchamiento en el apoyo del nudo viga-columna. La carga máxima resistida por el espécimen TASCV3α0-R1c en la cartela izquierda fue de +29.49 ton y en la cartelada derecha fue de +30.67 ton. La deflexión máxima en la cartela izquierda medida en el vértice en la dirección positiva fue $\Delta = +32.26$ mm y en la dirección negativa fue $\Delta = -32.80$ mm. La deflexión máxima en la cartela derecha medida en el vértice en la dirección positiva fue $\Delta = +32.70$ mm y en la dirección negativa fue $\Delta = -32.34$ mm. Las grietas asociadas a la falla del espécimen atravesaron todo su ancho, y en este caso se presentó en la cartela izquierda.

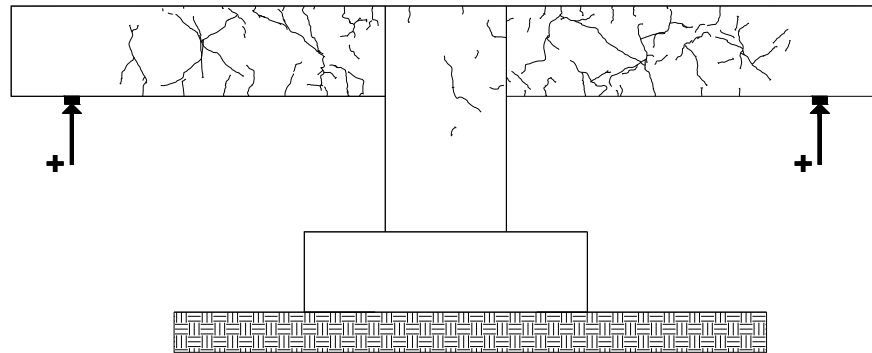
6.7.1 Evolución del daño

Se emplearon cuatro colores diferentes para identificar y marcar las grietas que se generaban durante el ensaye tal y como se explicó anteriormente en la sección 6.2.1, y en los picos de máxima deflexión en cada ciclo se identificó con el desplazamiento máximo objetivo de ese medio ciclo. En la figura 6.60 se presentan los agrietamientos registrados después del primer ciclo de cada desplazamiento de las deflexiones características (Δ_{agr} , Δ_u , Δ_{clps}).

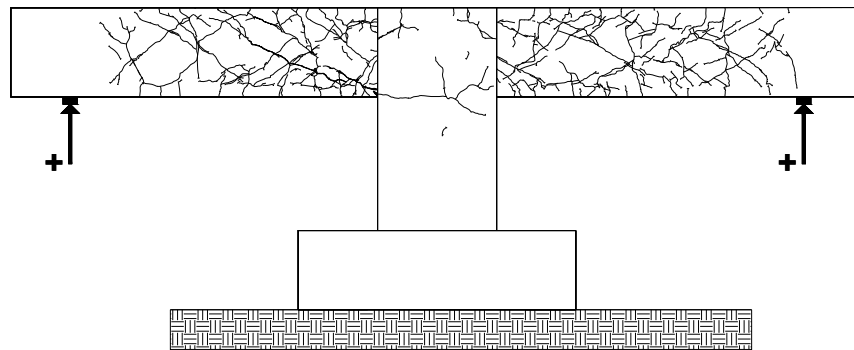
Durante el ensaye experimental, el primer indicio de daño fue la aparición de grietas diagonales que correspondieron al primer agrietamiento diagonal y que forman parte del segundo medio ciclo de desplazamiento, $\Delta = 6$ mm ($\Delta_{agr} = -6.18$ mm y $V_{agr} = 10.77$ ton); las grietas aparecieron en ambas cartelas. Al finalizar los ciclos correspondientes a $\Delta = 12$ mm, se observó que el ancho máximo de grieta fue de 0.5 mm en la cartela de lado izquierdo, y en la cartela derecha el ancho máximo de grieta fue 0.25 mm (figura 6.61b).

En el ciclo negativo, correspondiente al desplazamiento $\Delta = 16$ mm, el ancho máximo en la grieta de la cartela del lado izquierdo y en la grieta de la cartela de lado derecho fue de 0.8 mm. En el segundo ciclo correspondiente al desplazamiento $\Delta = 20$ mm se presentó la falla del espécimen en la cartela del lado izquierdo ($\Delta_u = -19.36$ mm y $V_u = 29.49$ ton) con un ancho de grieta máximo de 1.5 mm y se observó desconchamiento cerca del apoyo (figura 6.61c). Para los siguientes ciclos ($\Delta = 28$ mm), en la cartela de la izquierdo se

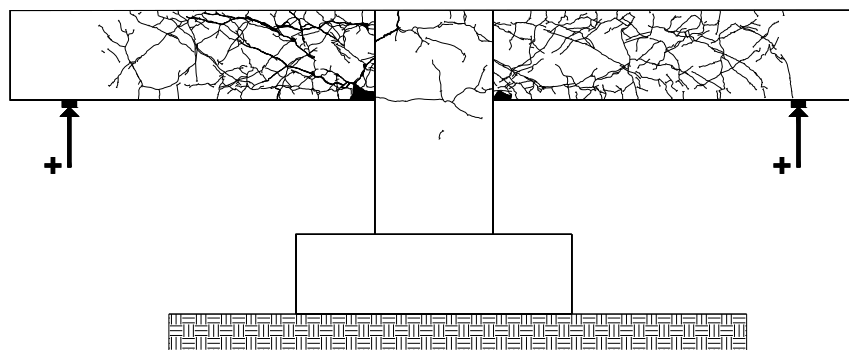
observó aplastamiento en la parte inferior del apoyo; además, se observó una abertura de 8mm en la zona del vértice y se presentó un desconchamiento generalizado alrededor de la grietas principales, presentando un ancho de grieta máximo de 12 mm. Mientras se estaba descargando, se observó desprendimiento de concreto en el apoyo.



a) Primer agrietamiento



b) Falla

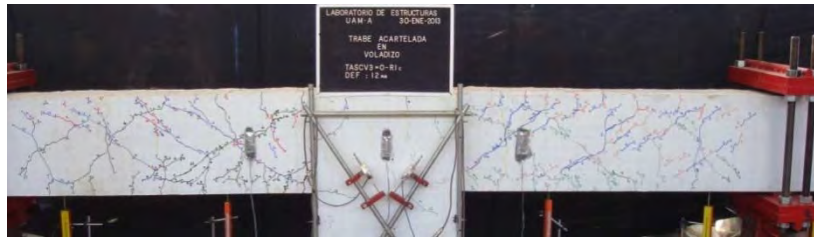


c) Colapso

Figura 6.60 Evolución del agrietamiento



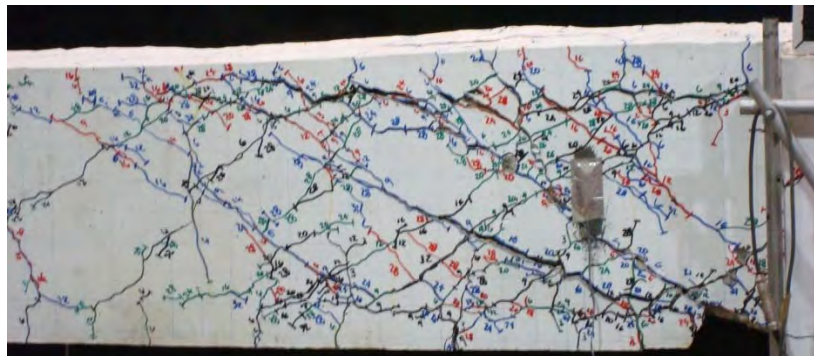
a) Ciclos correspondientes a $\Delta = 6$ mm



b) Ciclos correspondientes a $\Delta = 12$ mm



c) Ciclo $\Delta = 20$ mm, falla de la trabe



d) Ciclo $\Delta = 32$ mm, colapso de la trabe

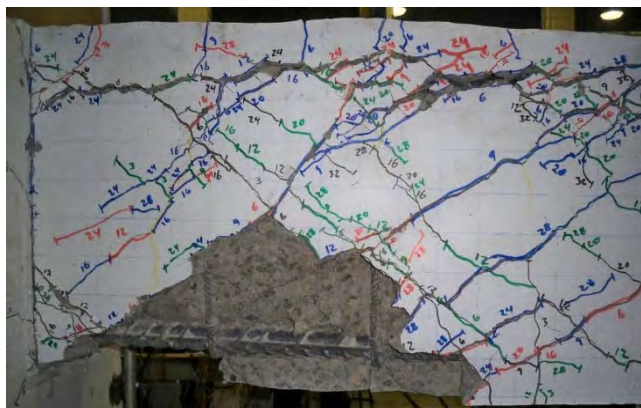
Figura 6.61 Elemento TASCV3α0-R1c durante el ensaye

El colapso de la trabe ocurrió al término del segundo medio ciclo correspondiente a $\Delta = 32$ mm ($\Delta_{clps} = 32.26$ mm y $V_{clps} = -14.72$ ton), ya que se observó pérdida de recubrimiento en la cartela izquierda cerca del nudo viga-columna; además, se observó que mientras se descarga seguía perdiendo concreto y se perdió adherencia en el concreto en lecho superior e inferior del refuerzo longitudinal (figura 6.62b). También se observó que el

espécimen ya se encontraba perdiendo capacidad de carga y fue donde se concluyó el ensaye. Cabe señalar que el espécimen no se llevó al colapso total, debido a que se reutilizará el acero.



a) Desprendimiento y desconchamiento de concreto en el apoyo



b) Pérdida de adherencia en el concreto

Figura 6.62 Detalle del daño en la cartela de lado izquierdo

6.7.2 Comportamiento Carga-Deflexión

En las figuras 6.63 y 6.64 se muestran las curvas de histéresis obtenidas para cada cartela, donde la deflexión Δ es la que fue medida por los transductores de desplazamientos colocados a lo largo de las cartelas y los micrómetros que fueron colocados en el nodo

viga-columna, como se menciona en el capítulo cuatro, y el cortante, V , es el que corresponde a la carga cíclica a la que fue sometida el espécimen en sus extremos.

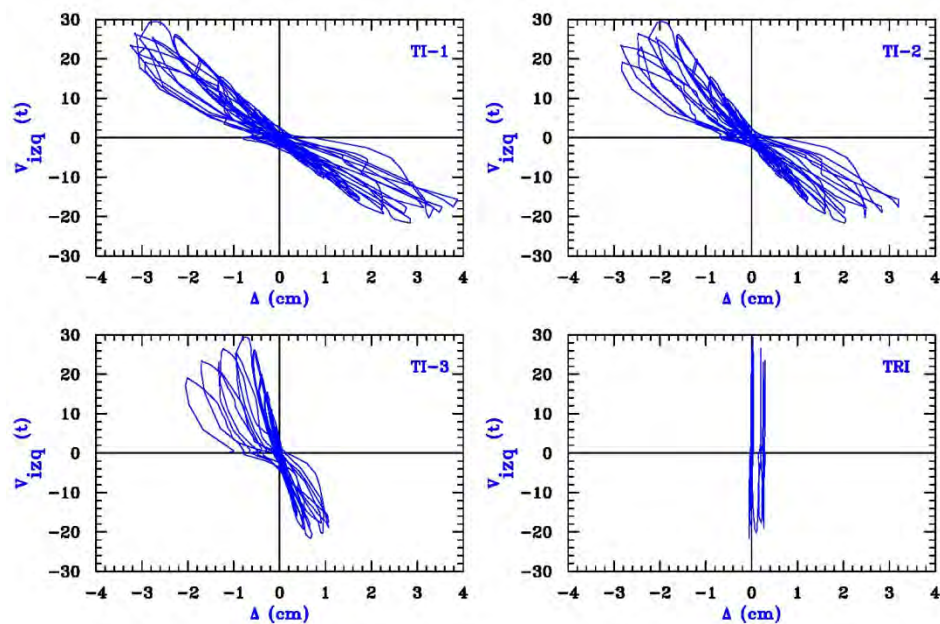


Figura 6.63 Curva de histéresis de cartela izquierda del espécimen TASCV3α0-R1c

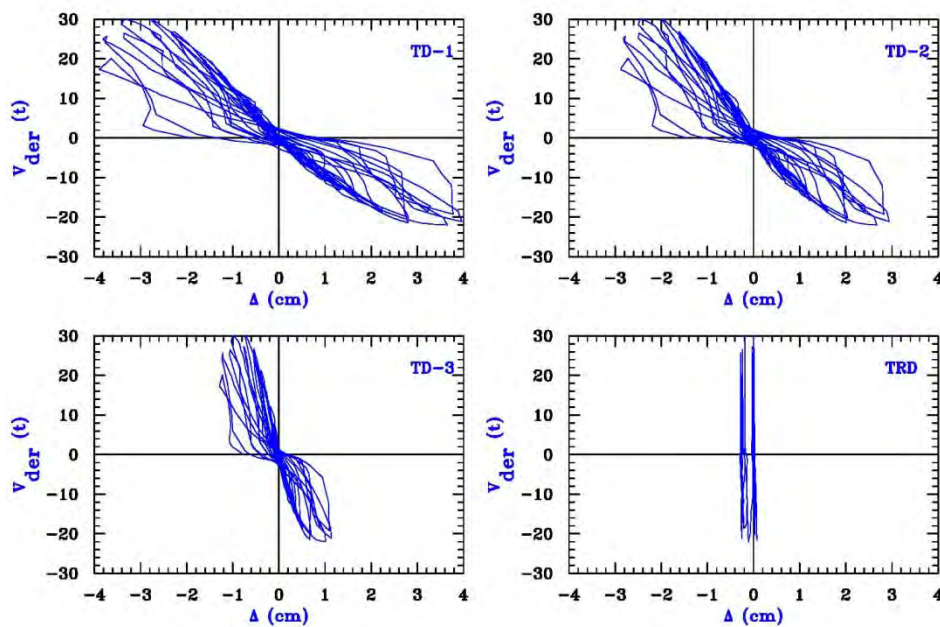


Figura 6.64 Curva de histéresis de cartela derecha del espécimen TASCV3α0-R1c

El cortante máximo resistido por la cartela del lado izquierdo fue de 29.49 ton y su desplazamiento máximo fue de 32.26 mm. Cabe mencionar que el cortante máximo resistido en la cartela derecha fue similar que en la cartela izquierda. El comportamiento fuerza cortante contra deflexión en todas las gráficas de las figuras 6.63 y 6.64 presentan un estrangulamiento en el origen, además, se aprecia una ligera asimetría en las gráficas, la cual se atribuye tanto al armado longitudinal como al peso propio y a la geometría de las cartelas.

Los transductores que fueron monitoreados durante el ensaye fue el TD-2, correspondiente a la cartela derecha, y TI-2 correspondiente a la cartela izquierda, ambos colocados como se muestra en la figura 6.65.

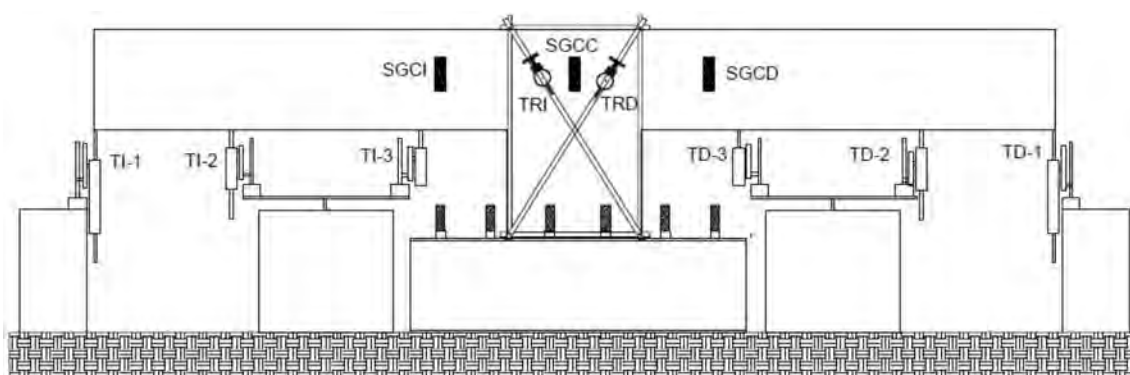


Figura 6.65 Identificación de transductores y strain gages de concreto

6.7.3 Análisis de la instrumentación interna

En esta sección se presenta la evaluación del comportamiento del elemento TASCV3α0-R1c con base en los registros de los strain gages adheridos al refuerzo transversal y longitudinal, tanto en las cartelas como en la columna. Además, se presenta el registro de los strain gages adheridos al concreto ubicados en las cartelas y el nodo viga-columna.

6.7.3.1 Refuerzo longitudinal en trabe

En la figura 6.66 se muestra, a manera de esquema, la identificación de la instrumentación interna en el refuerzo longitudinal del espécimen. En las figuras 6.67 y 6.68 se presenta el comportamiento carga-deformación de los deformímetros eléctricos adheridos al refuerzo longitudinal superior (RS) e inferior (RI), como también al refuerzo longitudinal en el nodo viga-columna (RC), dichos dispositivos se dividen en grupos; los representativos para la cartela de lado izquierdo (I), y para la cartela de lado derecho (D).

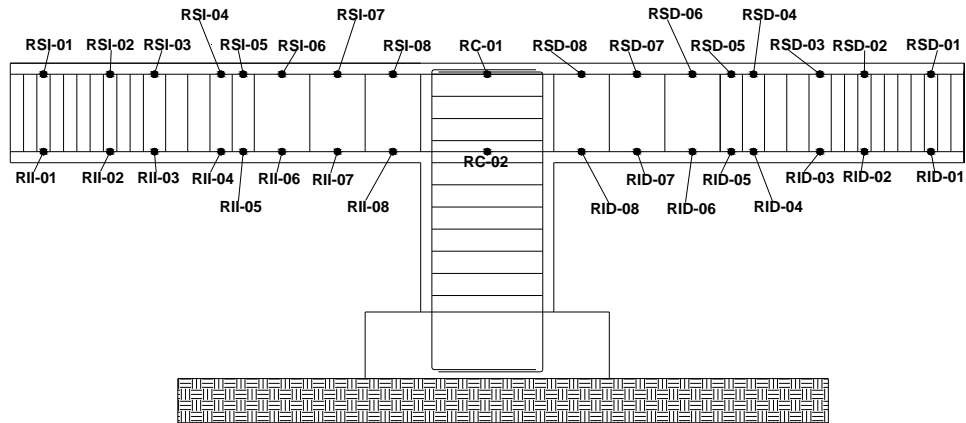


Figura 6.66 Identificación de strain gages en refuerzo longitudinal

En la figura 6.67 se observa un proceso evolutivo de deformación conforme la instrumentación se acerca al nudo viga-columna, donde los deformímetros que experimentaron fluencia fueron: RII-05, RII-06, RII-07, RII-08, RSI-06, RSI-07 y RSI-08. Mientras tanto, en la cartela de lado derecho (figura 6.68) se observa un proceso evolutivo de deformación conforme la instrumentación se acerca al nudo viga-columna. Los deformímetros que experimentan fluencia fueron: RID-02, RID-04, RID-06, RID-07, RID-08, RSD-06, RSD-07 y RSD-08.

Los niveles de deformación fueron ligeramente diferentes en ambos lados de las cartelas, ya que el lado que falló fue la cartela del lado izquierdo. Además, se registró la fluencia en los deformímetros de ambos lechos del refuerzo longitudinal del lado izquierdo, cercanos al nudo viga-columna, lo cual se corrobora con el patrón de daño mostrado en la figura 6.66b, y con el desprendimiento del recubrimiento que se presentó en la parte inferior de la cartela izquierda, así como el desconchamiento en el apoyo de lado izquierdo del nudo viga-columna.

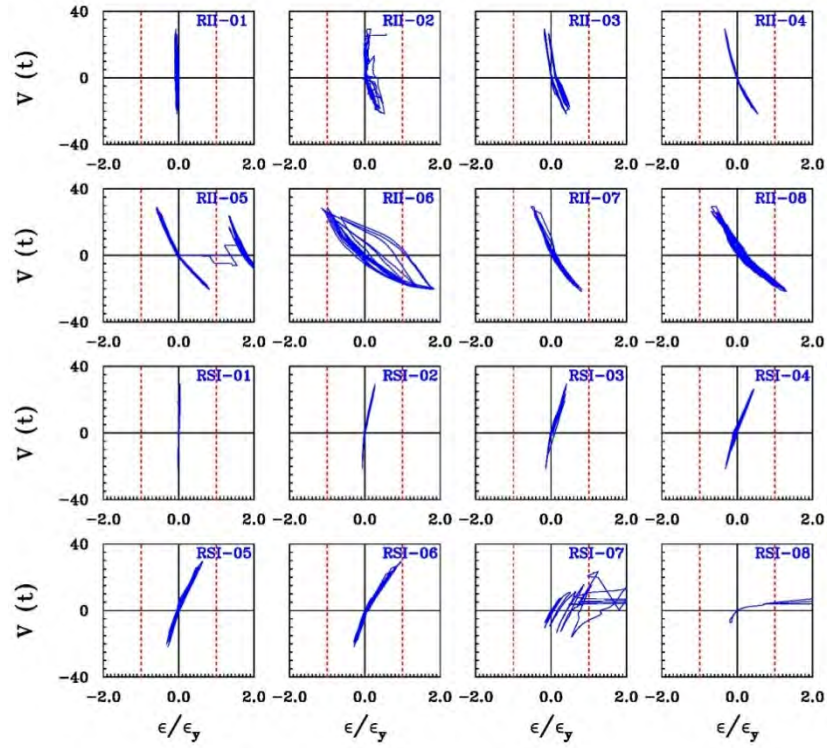


Figura 6.67 Deformaciones en el refuerzo longitudinal cartela izquierda (TASCV3α0-R1c)

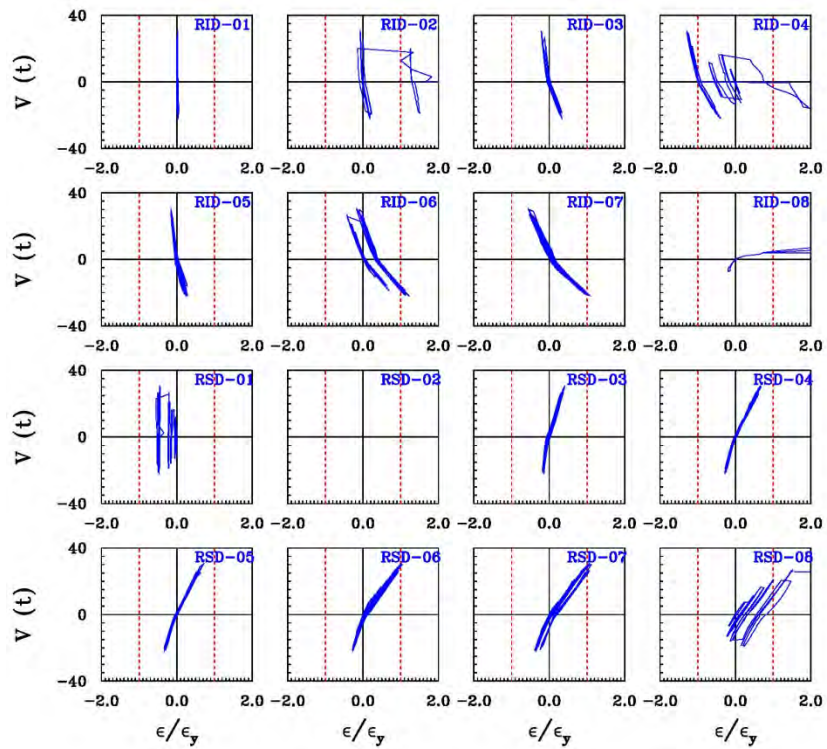


Figura 6.68 Deformaciones en el refuerzo longitudinal cartela derecha (TASCV3α0-R1c)

6.7.3.2 Refuerzo transversal

El comportamiento carga-deformación de los deformímetros eléctricos adheridos al refuerzo transversal (E) se presenta en la figura 6.69. Los deformímetros se dividieron en dos grupos; los representativos para la cartela de lado izquierdo (I), y para la cartela de lado derecho (D). A manera de esquema, la identificación de la instrumentación interna en el refuerzo transversal se presenta en la figura 6.70.

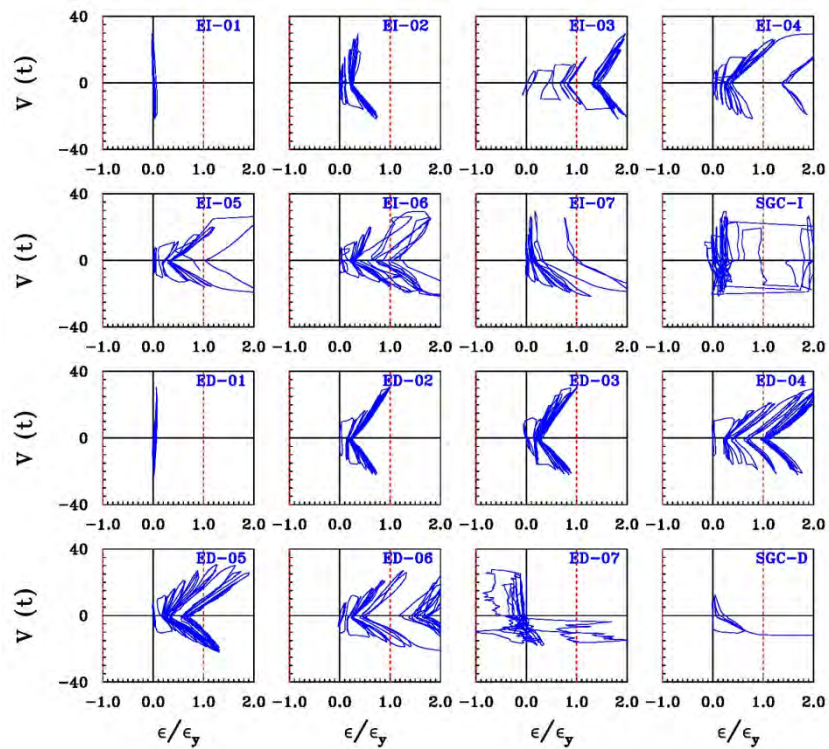


Figura 6.69 Deformaciones en el refuerzo transversal (TASCV3α0-R1c)

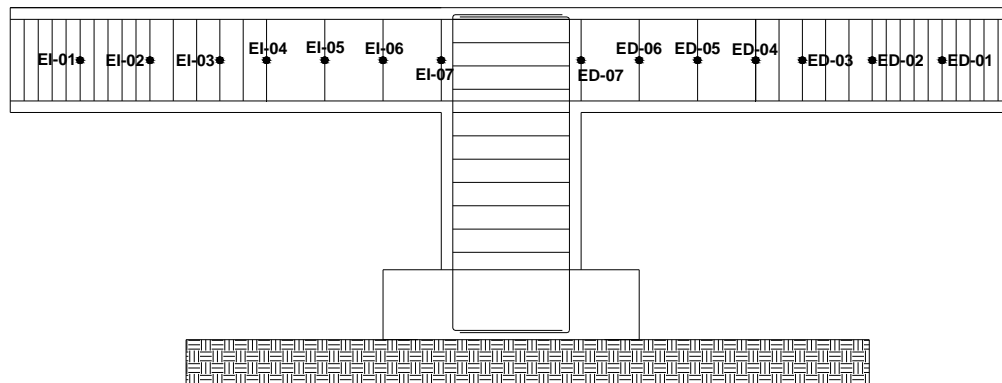


Figura 6.70 Identificación de strain gages en refuerzo transversal

Las deformaciones en el refuerzo transversal presentan un proceso evolutivo conforme se acercan al nudo viga-columna. En la cartela de lado izquierdo, que es el lado donde se presentó la falla, se observa que los deformímetros EI-03, EI-04, EI-05, EI-06 y EI-07 presentaron una deformación de fluencia al término de la prueba y fueron los que resistieron notablemente la aparición de grietas. En la cartela de lado derecho se observa que los deformímetros adheridos al refuerzo transversal que presentaron fluencia fueron: ED-02, ED-03, ED-04, ED-05, ED-06 y ED-07.

También se observa que los strain gages de concreto de ambas cartelas presentaron daño debido a que en la zona donde fueron colocados se presentaron grietas.

6.7.3.3 Refuerzo longitudinal y transversal en la columna

En la figura 6.71 se muestra, a manera de esquema, la identificación de la instrumentación interna en el refuerzo longitudinal y transversal de la columna. En la figura 6.72 se presenta el comportamiento carga-deformación de los deformímetros eléctricos adheridos al refuerzo longitudinal de la columna del lado izquierdo (RCI) y del lado derecho (RCD), como también el refuerzo longitudinal en el nudo viga-columna y en la parte inferior de la columna (RC). Además, se presenta los deformímetros eléctricos adheridos al refuerzo transversal (EC).

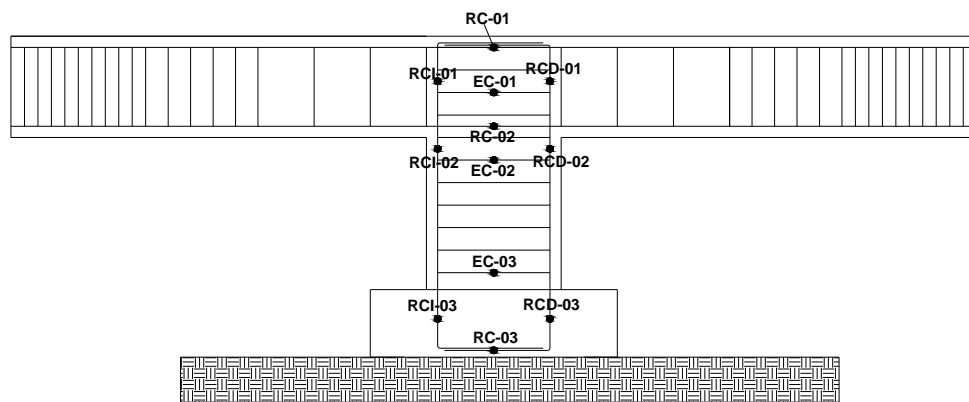


Figura 6.71 Identificación de strain gages en columna

Las carga P_c y V_c que se presentan en la figura 6.72 fueron obtenidas mediante el equilibrio de fuerzas, debido a que la carga cíclica a la que fue sometida el espécimen en sus extremos no se podía graficar directamente como en las figuras anteriores. En la figura 6.72 las deformaciones en el refuerzo longitudinal de la columna se presenta proceso evolutivo conforme se acercan al nudo viga-columna, además, se observa que las

deformaciones fueron relevantes en el acero longitudinal de la columna, esto se debe a que se presentó daño leve en el nodo viga-columna.

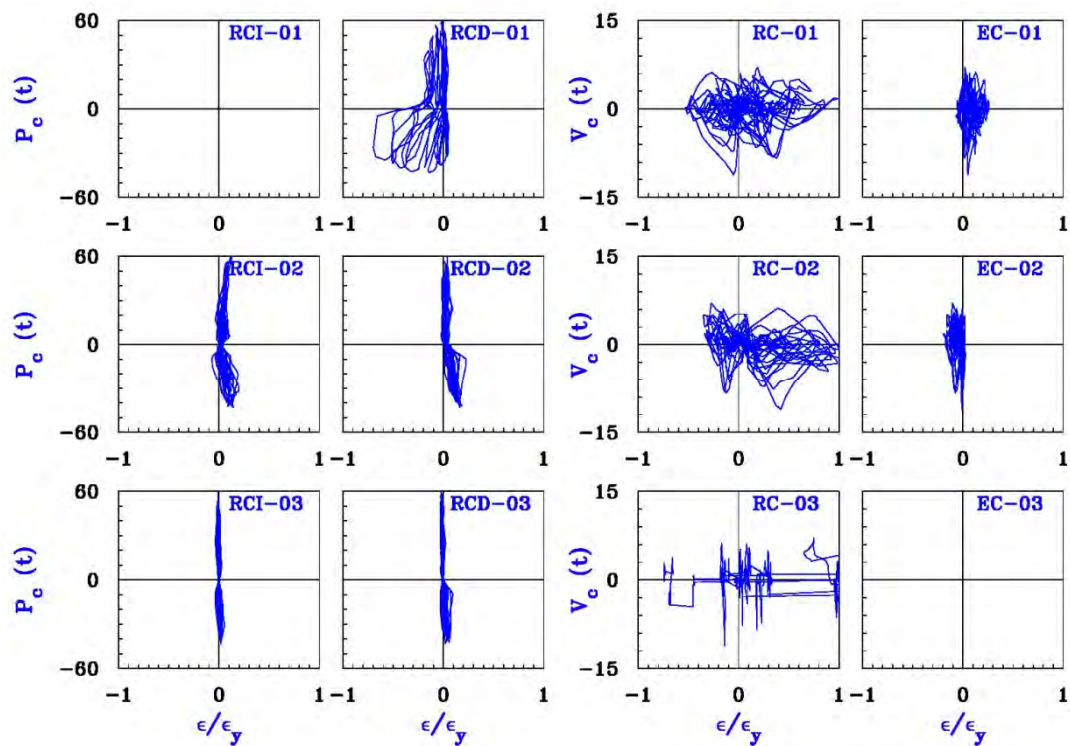


Figura 6.72 Deformaciones en el refuerzo longitudinal y transversal de la columna (TASCV3α0-R1c)

Capítulo 7

Análisis de resultados

7.1 Introducción

En este capítulo se presenta un análisis de los resultados obtenidos durante los ensayos experimentales realizados y se compara el desempeño general de los mismos. La comparación se realiza con base en un criterio de resistencia. Además, se hace una comparación de los ángulos de inclinación de la grieta principal de acuerdo a la propuesta hecha originalmente en Tena-Colunga *et al.* (2008) y en Grande (2009).

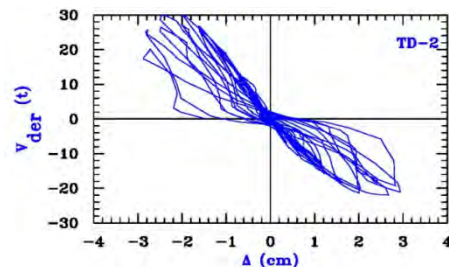
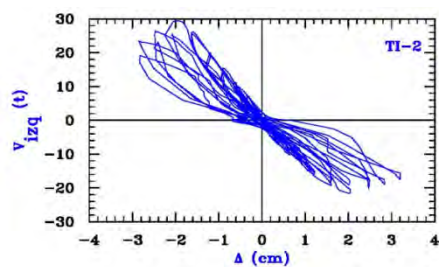
7.2 Resistencia

En la tabla 7.1 se presentan los cortantes asociados a la falla, V_u y colapso, V_{clps} , de los especímenes ensayados en este trabajo. Cabe señalar que los resultados que se presentan son los de las cartelas que tuvieron daño relevante. Además, se observa que al aumentar el ángulo de acartelamiento aumenta su resistencia a cortante, a excepción del elemento TASCV3 α 4-R1c, que se consideró diferente patrón de carga; como se mencionó en el capítulo seis los especímenes se sometieron al mismo patrón de desplazamiento, por lo cual no se considera una variable en la repuesta.

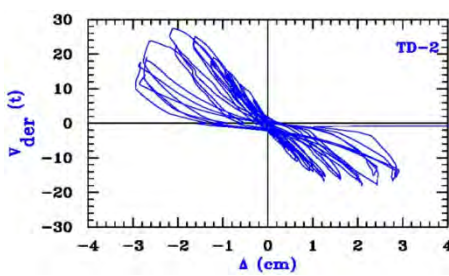
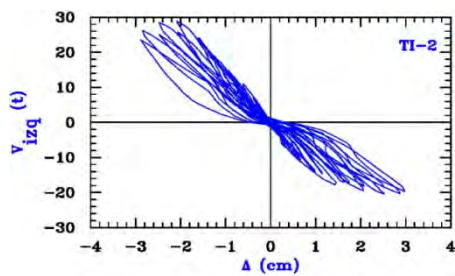
Tabla 7.1 Comparación de resistencias a cortante en los especímenes

Comparación de resistencias a cortante						
Especímen	Experimental				Teórico	Teórico
	V_u^+ (ton)	V_{clps}^+ (ton)	V_u^- (ton)	V_{clps}^- (ton)	(f'_c nominal) V_n (ton)	(f'_c experimental) V_{exp} (ton)
TASCV0 α 0-R1c	29.49	19.43	21.63	14.72	20.07	21.01
TASCV3 α 1-R1c	27.47	11.24	18.07	13.64	24.74	22.72
TASCV3 α 2-R1c	34.66	23.63	14.55	10.87	27.16	24.50
TASCV3 α 3-R1c	30.56	24.22	21.33	20.24	27.40	25.12
TASCV3 α 4-R1c	12.14	12.41	4.51	4.32	27.33	27.57

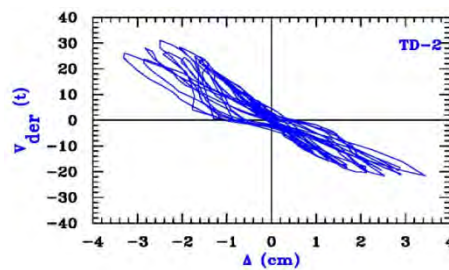
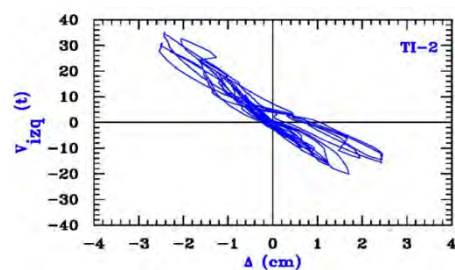
En la figura 7.1 se presenta las curvas de histéresis de cada cartela por espécimen, también se observa en todas las curvas un estrangulamiento en el origen, el cual es típico en elementos de concreto que fallan por cortante y se aprecia una ligera asimetría en los lazos de histéresis, la cual se atribuye tanto al armado longitudinal como al peso propio y la geometría de las cartelas, descartando al espécimen TASCV3 α 4-R1c, en el cual se presentó primero la falla en nudo viga-columna.



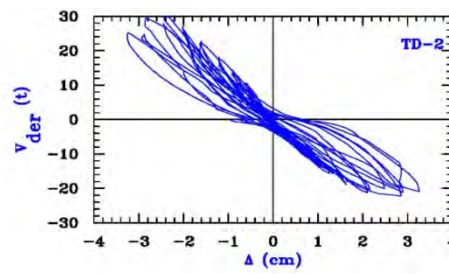
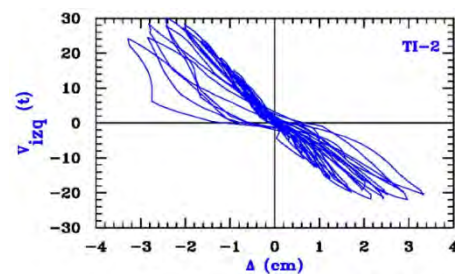
a) TASCV3 α 0-R1c



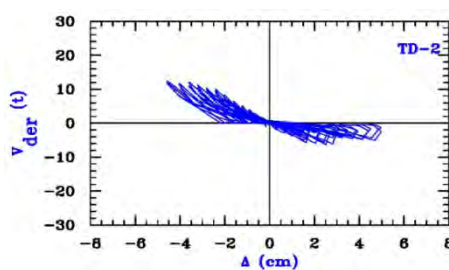
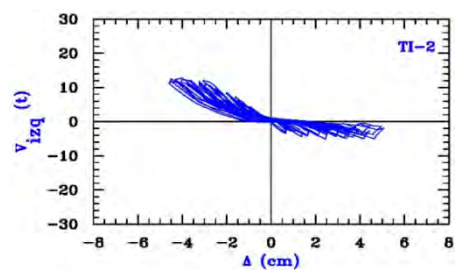
b) TASCV3 α 1-R1c



c) TASCV3 α 2-R1c



d) TASCV3 α 3-R1c



e) TASCV3 α 4-R1c

Figura 7.1 Curva de histéresis en las cartelas de cada espécimen

En la figura 7.2 se presentan las envolventes de los ciclos primeros y de repetición en cada cartela del espécimen. En las gráficas se indican las deflexiones asociadas al primer agrietamiento diagonal y falla asociados a la cartela que presentó daño relevante, así como la resistencia cortante esperada (V_{exp}) utilizando las propiedades medidas de los materiales (Apéndice A).

Además, en las gráficas de la figura 7.2 se muestran que ambas envolventes son idénticas hasta la aparición del primer agrietamiento, pero se observa una disminución de resistencia en los medios ciclos de repetición ocasionada por la aparición del primer agrietamiento. También se observa que los especímenes rebasan el cortante esperado (V_{exp}) en los primeros medios ciclos a excepción del elemento TASCV3α4-R1c.

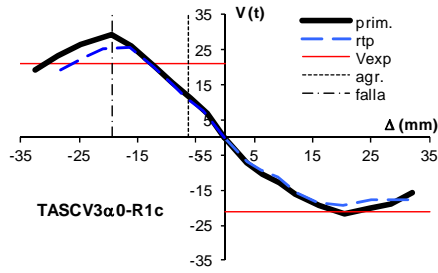
En la tabla 7.2 se presentan los tres principales desplazamientos en la cartela que falló para cada medio ciclo de carga, presentando un patrón de desplazamientos similar en ambos medios ciclos. Con dichos desplazamientos se evaluó la ductilidad esto es:

$$\mu_1 = \Delta_u / \Delta_{agr} \quad \mu_2 = \Delta_{clps} / \Delta_u \quad 7.1$$

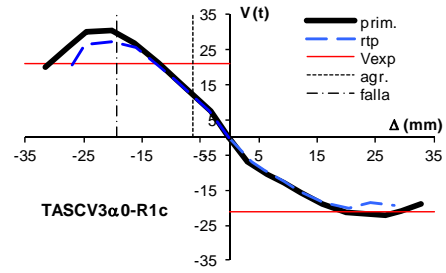
Tabla 7.2 Desplazamientos en los especímenes

Desplazamientos de medios ciclos						
Especimen	Primer medio ciclo positivo			Primer medio ciclo negativo		
	Δ_{agr}^+	Δ_u^+	Δ_{clps}^+	Δ_{agr}^-	Δ_u^-	Δ_{clps}^-
TASCV0α0-R1c	6.46	20.38	32.26	6.18	19.36	32.46
TASCV3α1-R1c	4.62	20.90	29.18	3.24	21.04	28.54
TASCV3α2-R1c	6.26	24.42	31.72	6.42	24.38	33.04
TASCV3α3-R1c	6.58	24.32	33.32	6.16	24.32	32.84
TASCV3α4-R1c	14.52	36.88	45.62	12.26	36.16	45.78

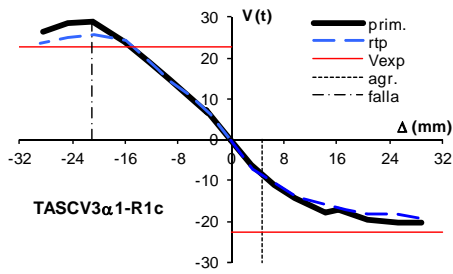
En la tabla 7.3 puede observarse que la capacidad de deformación, μ_1 , para ambos medios ciclos difiere en las ductilidades; siendo éstas mayores en los medios ciclos negativos. En la μ_2 , ocurre prácticamente lo mismo, donde se observa que al ir aumentando el grado de acartelamiento disminuye la capacidad de deformación. En general, la capacidad de deformación tanto en el intervalo elástico ($\mu < 1$) como en el intervalo inelástico ($\mu > 1$) para todos los elementos es casi la misma, a excepción del elemento TASCV3α4-R1c.



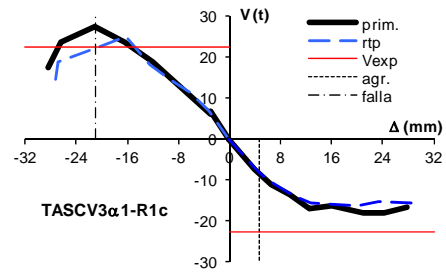
a) Cartela izquierda



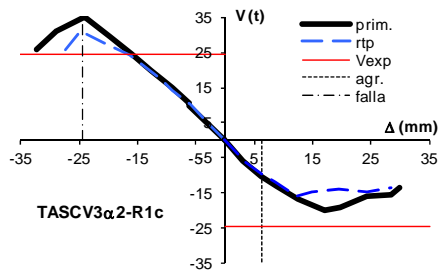
Cartela derecha



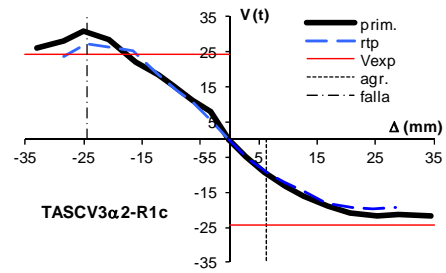
b) Cartela izquierda



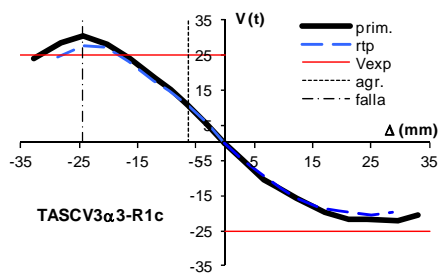
Cartela derecha



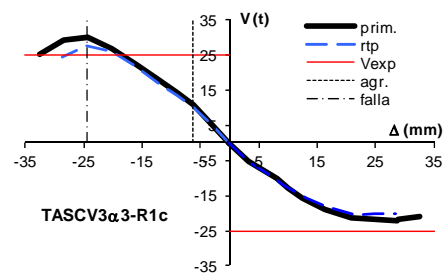
c) Cartela izquierda



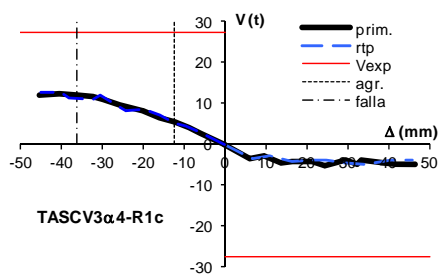
Cartela derecha



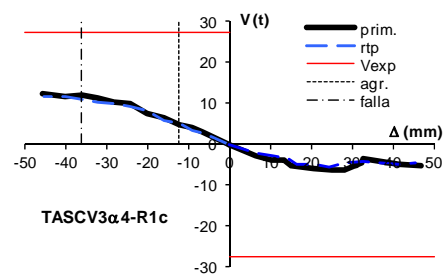
d) Cartela izquierda



Cartela derecha



e) Cartela izquierda



Cartela derecha

Figura 7.2 Envolventes de las curvas de histéresis en las cartelas de cada espécimen

Tabla 7.3 Ductilidad de desplazamientos de los especímenes

Ductilidades de desplazamiento				
Especimen	Primer medio ciclo positivo		Primer medio ciclo negativo	
	μ_1^+	μ_2^+	μ_1^-	μ_2^-
TASCV0α0-R1c	3.155	1.583	3.133	1.677
TASCV3α1-R1c	4.524	1.396	6.494	1.356
TASCV3α2-R1c	3.901	1.299	3.798	1.355
TASCV3α3-R1c	3.696	1.370	3.948	1.350
TASCV3α4-R1c	2.540	1.237	2.949	1.266

7.3 Degradación de la rigidez

En general, la rigidez es un parámetro que depende de las propiedades mecánicas de los materiales con los que se han construido, así como de las propiedades geométricas de los elementos que integran la estructura. La literatura técnica asocia varios factores en la reducción de rigidez, entre los cuales están: 1) fluencia del refuerzo; 2) deslizamiento del refuerzo longitudinal; 3) el agrietamiento y, 4) predominio de los efectos de cortante.

La degradación de rigidez en los especímenes sometidos ante carga cíclica se evaluó utilizando un parámetro denominado rigidez de ciclo, definido como la pendiente de la recta secante que une a los picos de dos medios ciclos durante un ciclo completo de carga(figura 7.3) calculada como:

$$K_c = \frac{V^+ + |V^-|}{\Delta^+ + |\Delta^-|} \quad 7.2$$

donde

K_c = es la rigidez de ciclo, expresada en ton/mm

V^+ = es la carga máxima del medio ciclo positivo

V^- = es la carga máxima del medio ciclo negativo

Δ^+ = es la deflexión asociada a V^+

Δ^- = es la deflexión asociada a V^-

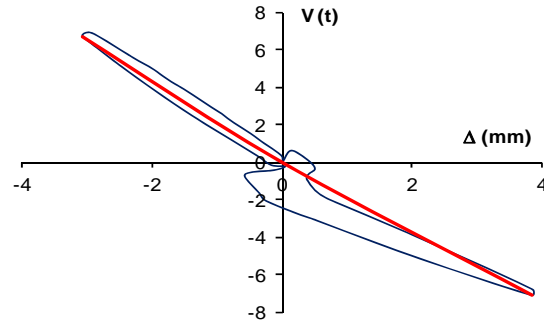
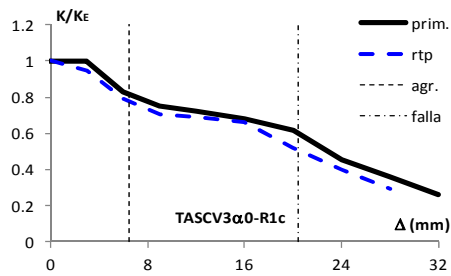
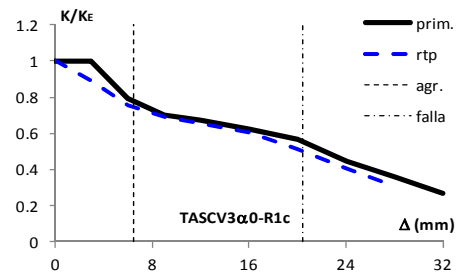


Figura 7.3 Rigidez de ciclo

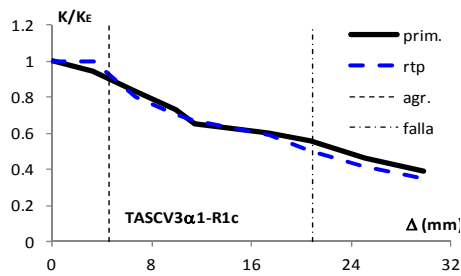
En la figura 7.4 se muestra la evolución de la rigidez para los ciclos primeros y los de repetición, estas rigideces están normalizadas por la rigidez inicial de los ciclos positivos K_E , la cual es la rigidez máxima de los ciclos de histéresis hasta el primer agrietamiento diagonal.



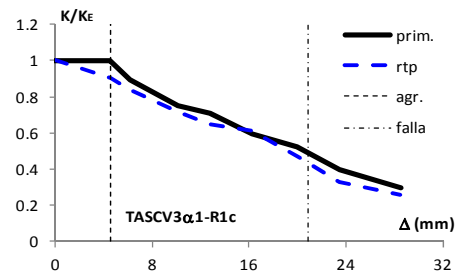
a) Cartela izquierda



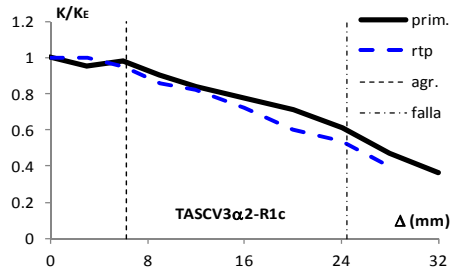
Cartela derecha



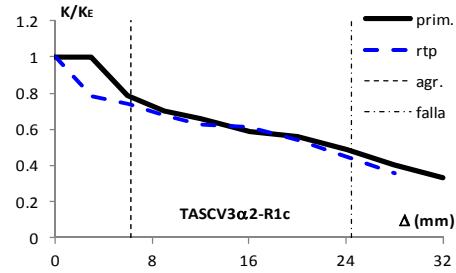
b) Cartela izquierda



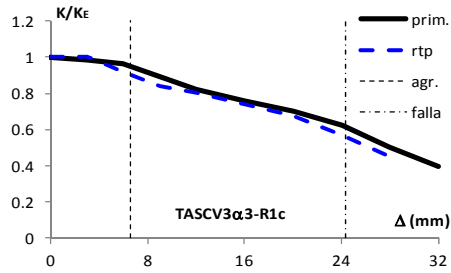
Cartela derecha



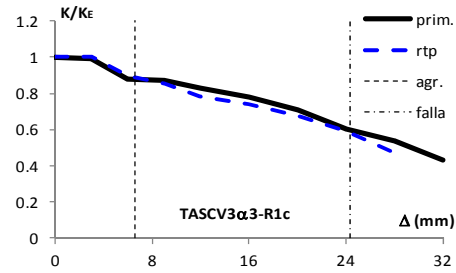
c) Cartela izquierda



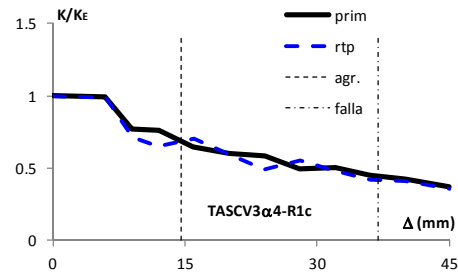
Cartela derecha



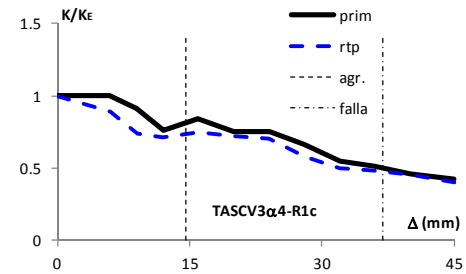
d) Cartela izquierda



Cartela derecha



e) Cartela izquierda



Cartela derecha

Figura 7.4 Efecto de la repetición de demandas en la rigidez

Tabla 7.4 Rigidez normalizada de los especímenes

Cartela Izquierda				
Espécimen	K_E (ton/mm)	K_{agr}/K_E	K_u/K_E	K_{clps}/K_E
TASCV0α0-R1c	2.08	0.83	0.62	0.26
TASCV3α1-R1c	2.10	0.94	0.56	0.39
TASCV3α2-R1c	1.73	0.95	0.53	0.36
TASCV3α3-R1c	1.72	0.92	0.62	0.39
TASCV3α4-R1c	0.50	0.76	0.45	0.37

Cartela Derecha				
Espécimen	K_E (ton/mm)	K_{agr}/K_E	K_u/K_E	K_{clps}/K_E
TASCV0α0-R1c	2.28	0.79	0.57	0.27
TASCV3α1-R1c	2.06	1.00	0.53	0.30
TASCV3α2-R1c	2.13	0.74	0.45	0.33
TASCV3α3-R1c	1.65	0.90	0.60	0.43
TASCV3α4-R1c	0.44	0.72	0.53	0.43

En la tabla 7.4 se indica el valor de la rigidez inicial para cada trabe en estudio. Como se esperaba, la rigidez inicial tiende a disminuir a medida que va aumentando el acartelamiento debido a la menor cantidad de concreto; a la vez se observa que la rigidez en ambas cartelas del espécimen no es idéntica. Aunque en ambas respuestas tienen la

misma tendencia, es notoria una degradación de la rigidez en los ciclos de repetición, principalmente a partir del primer agrietamiento diagonal (figura 7.4). Este fenómeno se asocia al agrietamiento del concreto, el cual, al no tener una plasticidad perfecta, pierde sus propiedades cuando esté se presenta, como lo menciona también Grande (2009).

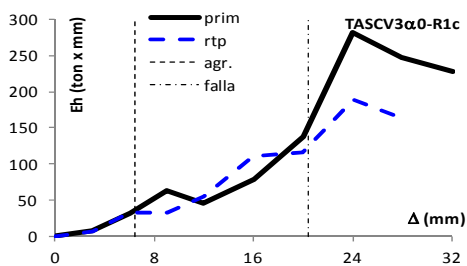
7.4 Disipación de energía

Como lo menciona Archundia en 2007; debido a que las demandas sísmicas se convierten en demandas de energía en una estructura sismo-resistente, es de suma importancia conocer la capacidad energética de los diferentes elementos que la forman (Grande 2009). La capacidad energética de un elemento se calcula con el área dentro de cada uno de los lazos de histéresis de la repuesta. En el caso de los elementos prismáticos o de sección constante dominados por los efectos del cortante, es bien sabido que la disipación de energía se reduce debido al adelgazamiento de los lazos de histéresis (Grande 2009).

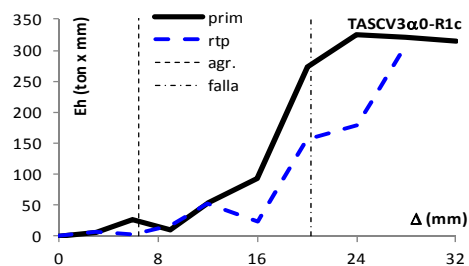
La disipación de energía generalmente es mayor al aumentar la deflexión de la estructura, debido a que el límite elástico de los materiales es superado y, por ende, se presentan deformaciones permanentes asociadas a la plastificación del refuerzo y al agrietamiento del concreto principalmente.

En la figura 7.5 se muestra la energía disipada de los elementos estudiados en cada ciclo, E_h , donde se ha separado la respuesta para los ciclos primeros y los de repetición. De la figura 7.5 se observa que, salvo el elemento TASC3V3-0-R1c en su cartela derecha y el elemento TASC3V3-3-R1c en su cartela izquierda, la energía en los ciclos primeros y de repetición es prácticamente la misma en ambas cartelas, hasta la aparición del primer agrietamiento diagonal, lo que confirma la linealidad de las propiedades hasta este estado.

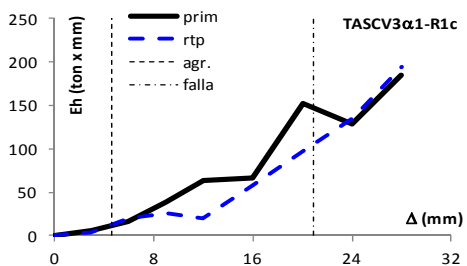
Una vez presentado el primer agrietamiento diagonal, y hasta poco antes de la falla, la tendencia que se observó fue que la energía requerida para cumplir con el desplazamiento es mayor en los ciclos primeros que en los de repetición, a excepción del elemento TASC3V3-2-R1c en su cartela derecha. Este comportamiento presentado en los especímenes es congruente con el concepto de ablandamiento del concreto, además también explica lo observado en los experimentos, es decir, que durante los ciclos de repetición generalmente no se generan nuevas grietas de importancia, sino que principalmente se ensanchan y extienden las grietas ya generadas. También es notorio que en algunos elementos se generó un súbito incremento de energía en el instante en que se formó la grieta de falla (figura 7.5).



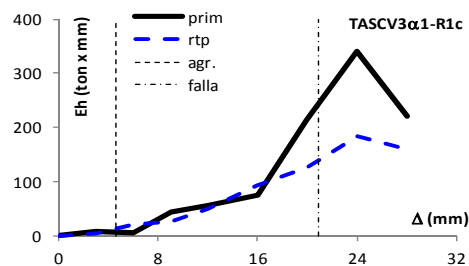
a) Cartela izquierda



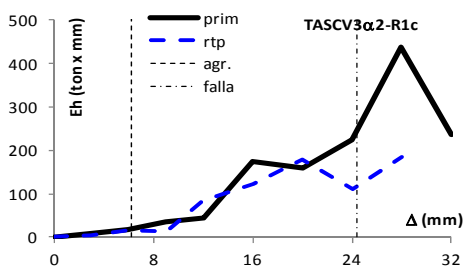
Cartela derecha



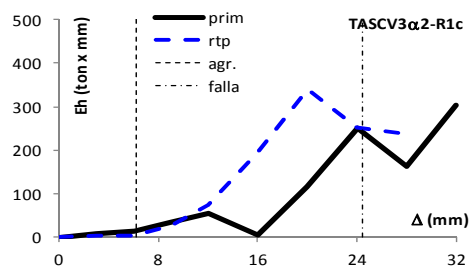
b) Cartela izquierda



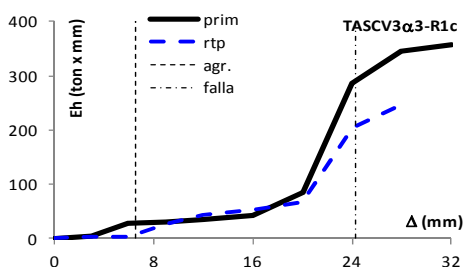
Cartela derecha



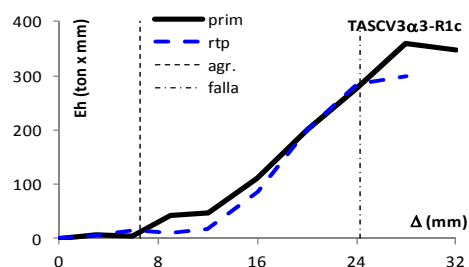
c) Cartela izquierda



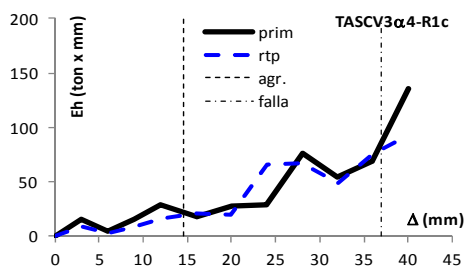
Cartela derecha



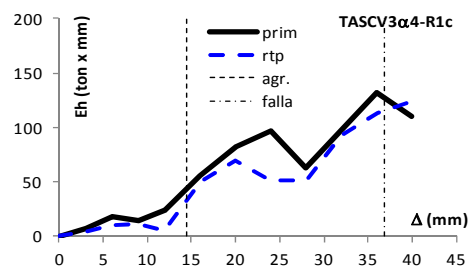
d) Cartela izquierda



Cartela derecha



e) Cartela izquierda

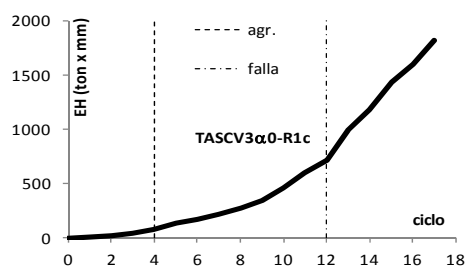


Cartela derecha

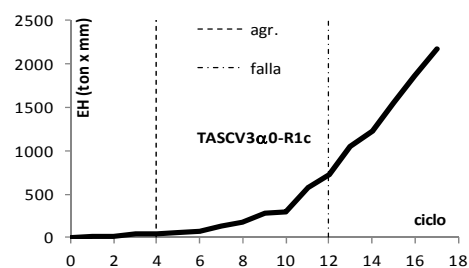
Figura 7.5 Energía histerética por ciclo, E_h

El hecho que el elemento TASCV3 α 2-R1c haya presentado una mayor energía en su cartela derecha en su ciclo de repetición que el ciclo primero, fue como consecuencia de la falla que se presentó en el dispositivo de la cartela de lado izquierdo, como se mencionó en capítulo 6, al momento de cambiar el conector dañado y la celda de carga, se realizó la descarga sólo en la cartela de lado derecho registrando los datos correspondientes.

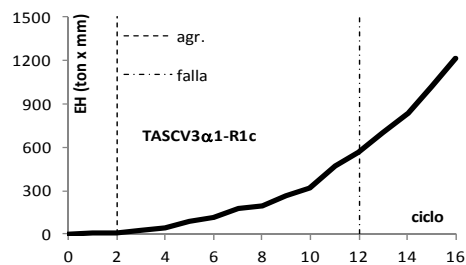
En la figura 7.6 se muestra la energía acumulada, EH, de ambas cartelas de los elementos estudiados, donde se observa que las trabes acarteladas permiten desarrollar una capacidad energética mayor que la de una trabe prismática con un mayor número de ciclos. Además, se observa la relación directa de la energía histerética acumulada, EH, con los ciclos físicos que desarrollaron cada uno de los elementos TASCV3 α i-R1c durante el ensaye experimental.



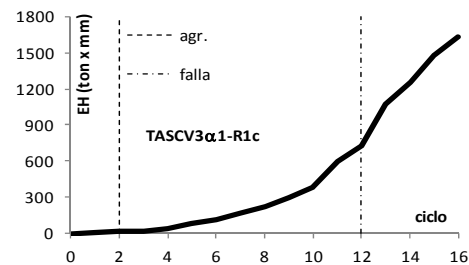
a) Cartela izquierda



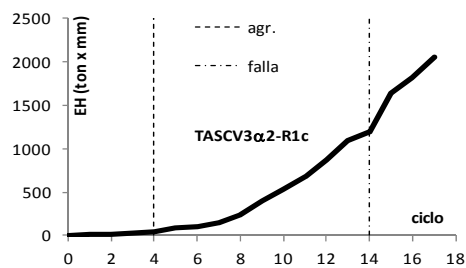
Cartela derecha



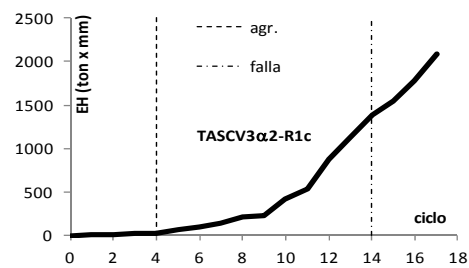
b) Cartela izquierda



Cartela derecha



c) Cartela izquierda



Cartela derecha

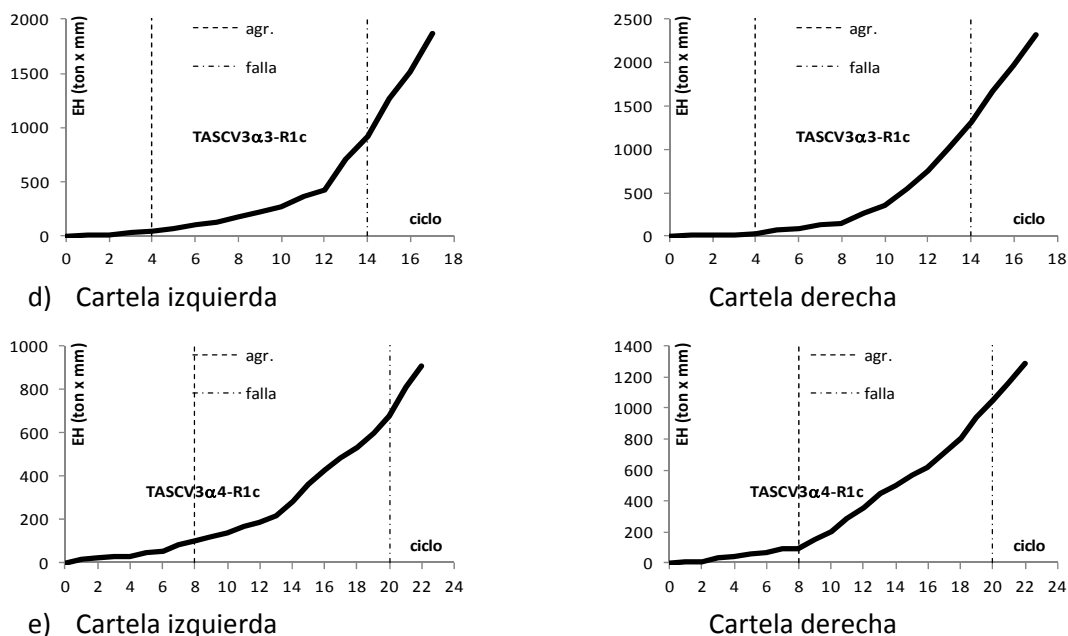


Figura 7.6 Energía histerética acumulada, EH

En la figura 7.7 se muestra una comparación de la energía histerética acumulada, EH, de cada cartela de los especímenes. En la tabla 7.5 se presenta los valores asociados a los estados de primer agrietamiento diagonal, falla y colapso, así como en el ciclo en el que se presentaron. De la tabla 7.5 se observa que la energía histerética en cada cartela no es idéntica. Además, es evidente que el elemento prismático requirió de mayor energía para formar el primer agrietamiento diagonal en comparación con los elementos acartelados, descartando al elemento TASC3α4-R1c debido a que se presentó primero la falla el nudo viga-columna.

Al momento de presentarse la falla, los elementos TASC3α0-R1c y TASC3α1-R1c disiparon una cantidad de energía similar con igual número de ciclos, y el elemento que disipó una mayor cantidad de energía al instante de la falla fue el elemento TASC3α2-R1c. Al instante del colapso, el elemento TASC3α1-R1c disipó una menor cantidad de energía en comparación con los demás elementos. Por otra parte, se observó que el elemento TASC3α0-R1c no presentó una disipación de energía menor que los elementos acartelados, como era de esperarse.

Con la finalidad de hacer una comparación más justa sobre la eficiencia de las trabes acarteladas en disipar energía, se evaluó la densidad de energía histerética acumulada (U_0), definida como:

$$U_0 \cong \frac{\int_0^{nciclos} \partial E_H}{V_{cartela}} = \frac{EH}{Lb \left(\frac{h_{max} + h_{min}}{2} \right)} \quad 7.3$$

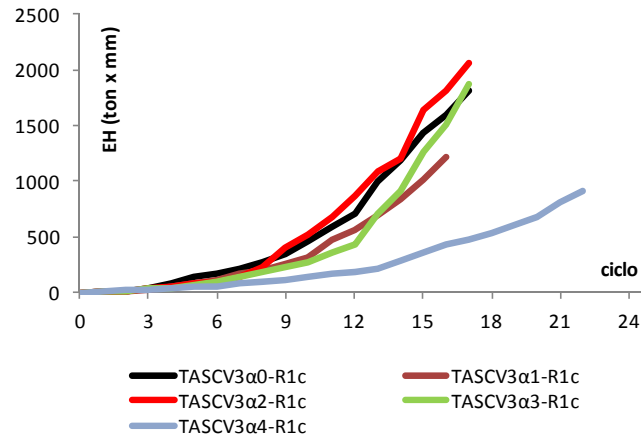
donde esencialmente se divide la energía disipada entre el volumen del elemento. En este caso, como las mediciones del cortante aplicado y la deformación medida involucra la extensión de la cartela (L=125 cm), entonces en todos los casos se dividió la energía acumulada (EH) entre el volumen de la cartela (ec. 7.3).

Tabla 7.5 Energía histerética acumulada, EH, (ton x cm)

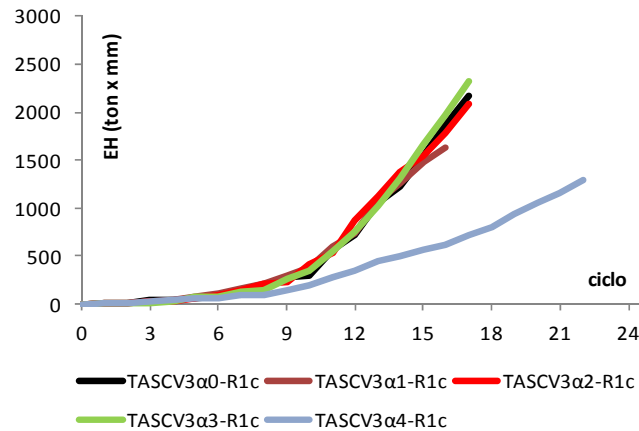
Cartela izquierda							
Especimen	Agrietamiento		Falla		Colapso		U ₀ (ton/cm ²)
	ciclo	EH _{agr}	ciclo	EH _u	ciclo	EH _{clps}	
TASCV0α0-R1c	4	7.68	12	71.35	17	181.87	0.0013
TASCV3α1-R1c	2	1.03	12	56.80	16	121.14	0.0009
TASCV3α2-R1c	4	4.86	14	119.83	17	205.59	0.0017
TASCV3α3-R1c	4	4.21	14	91.81	17	187.04	0.0017
TASCV3α4-R1c	8	10.03	20	67.61	23	90.50	0.0009

Cartela Derecha							
Especimen	Agrietamiento		Falla		Colapso		U ₀ (ton/cm ²)
	ciclo	EH _{agr}	ciclo	EH _u	ciclo	EH _{clps}	
TASCV0α0-R1c	4	4.34	12	72.63	17	217.41	0.0015
TASCV3α1-R1c	2	1.33	12	72.85	16	163.52	0.0013
TASCV3α2-R1c	4	2.93	14	137.93	17	208.36	0.0018
TASCV3α3-R1c	4	3.16	14	130.88	17	231.48	0.0021
TASCV3α4-R1c	8	9.49	20	105.23	23	128.73	0.0012

Se confirma básicamente lo observado por Archundia *et al.* (2013), que a medida que aumenta el ángulo de acartelamiento α , aumenta la densidad de energía histerética acumulada, U₀. Las excepciones son el espécimen TASCV3α1-R1c, y sobre todo el espécimen TASCV3α4-R1c, donde, como ya se ha explicado, falló el nudo como consecuencia que las cargas se aplicaron de manera diferente, por lo que para fines prácticos, este resultado no debiera tomarse para fines de esta comparación, pues las cartelas no fallaron a cortante. Por lo tanto, si se puede concluir que, en general, las cartelas son más eficientes para disipar energía por unidad de volumen que las trabes prismáticas, y que esta eficiencia es más evidente para ángulos $\alpha \geq 6^\circ$.



a) Cartela izquierda

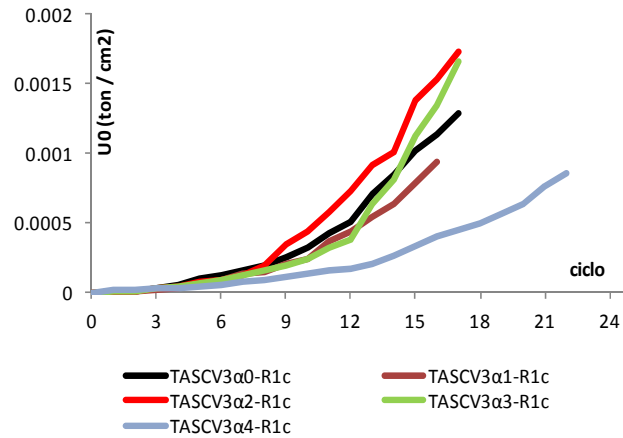


b) Cartela derecha

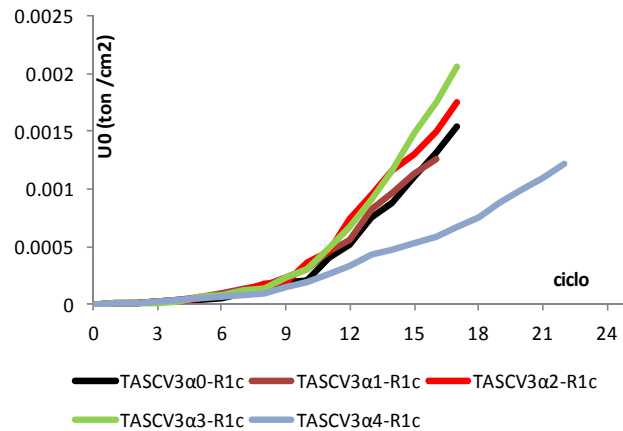
Figura 7.7 Comparación de la energía histerética acumulada en los elementos, EH

En la figura 7.7 se hace evidente que, en cuanto a disipación de energía, prácticamente los elementos presentaron un comportamiento similar como lo descrito con su agrietamiento (capítulo seis), salvo el elemento TASCV3α4-R1c, debido a que se presentó primero la falla el nudo viga-columna.

En general, la disipación de energía en los elementos se asoció directamente con la existencia de agrietamiento y desconchamiento del concreto, con la fricción desarrollada a lo largo de las grietas, con la fluencia del refuerzo horizontal y del refuerzo vertical.



a) Cartela izquierda



b) Cartela derecha

Figura 7.8 Comparación de la densidad de energía histerética acumulada en los elementos, U_0

En la figura 7.8 se compara la evolución por ciclo de la densidad de energía histerética acumulada para cada uno de los especímenes en estudio. En estas gráficas se aprecia más claramente que, salvo los especímenes ya mencionados, las trabes acarteladas son más eficientes disipando energía que las trabes prismática a medida que aumentan los ciclos y a medida que aumenta el ángulo de acartelamiento α . Esto se observa principalmente para las cartelas de 6° y 8° (TASCV3 α_2 -R1c y TASCV3 α_2 -R1c respectivamente), donde se aprecia que disipan más energía por unidad de volumen (U_0) que la trabe prismática desde ciclos de deformación entre 10 y 14 mm (cartela izquierda) y desde 10 mm (cartela derecha).

7.5 Inclinación de grietas

De acuerdo con la propuesta de Tena-Colunga *et al.* (2008), la contribución del acero del refuerzo transversal está dada por la siguiente expresión:

$$V_s = \frac{A_v f_{yv} d_{cr}}{s \tan(\theta)} \quad 7.4$$

donde:

$$\theta = 45 - \alpha \quad 7.5$$

En la tabla 7.6 se observa que la trabe prismática presentó un agrietamiento con una inclinación menor a lo estipulado por la teoría clásica que explica el mecanismo resistente a cortante, la que supone ángulo de 45°. Respecto a este tema, Archundia *et al.* (2005) mencionan que han surgido teorías más racionales que explican el mecanismo resistente a cortante aceptando que el agrietamiento no precisamente tiene una inclinación de 45°, ya que supone que este depende de la deformación unitaria del acero longitudinal a tensión. Para el resto de los especímenes, se observa que el ángulo de inclinación de la grieta diagonal disminuye conforme aumenta el ángulo de acartelamiento, para el caso de las grietas definidas por la carga negativa se presenta que el ángulo de inclinación de la grieta diagonal disminuye conforme aumenta el ángulo de acartelamiento, a excepción del elemento TASCV3α3-R1c, donde aumenta. El elemento TASCV3α4-R1c no presentó grieta diagonal, a consecuencia de que la falla se presentó primero en el nudo viga-columna.

Tabla 7.6 Ángulo de inclinación de la grieta principal de falla +V y -V

Ángulo de inclinación de grieta principal				
Especimen	α	Experimental		Propuesta
		θ^+	θ^-	θ
TASCV0α0-R1c	0	32	30	45
TASCV3α1-R1c	3.21	39	34	42
TASCV3α2-R1c	6.39	35	28	39
TASCV3α3-R1c	8.19	35	30	37
TASCV3α4-R1c	10.43	-	-	35

En la figura 7.9 se muestra la relación al comparar los ángulos de agrietamiento principales, tanto positivos como negativos, con la propuesta (Tena-Colunga *et al.* 2008),

donde se aprecia que esta última se localiza por arriba de los ángulos de inclinación principales.

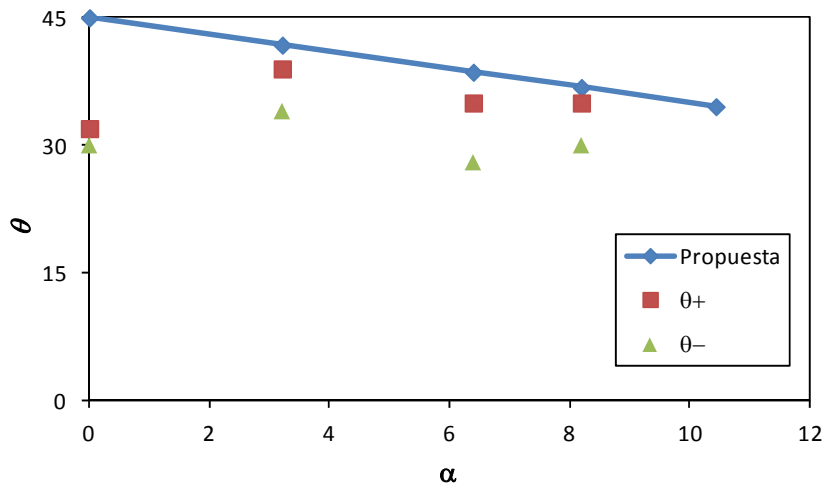


Figura 7.9 Ángulos de inclinación de las grietas principales y la propuesta de acuerdo con Tena-Colunga *et al.* 2008

Capítulo 8

Resumen y conclusiones

8.1 Resumen

Se realizó el ensaye experimental de cinco especímenes que constan de cinco geometrías distintas, con refuerzo mínimo por cortante. Los especímenes cubren de manera razonablemente uniforme en un intervalo de cero a diez grados de acartelamiento, α .

Todos los especímenes se sometieron a cargas cíclicas (de empuje y jale) aplicadas en los extremos. Las variables estudiadas fueron el ángulo de acartelamiento, el efecto del confinamiento ante cargas cíclicas y la contribución del acero de refuerzo transversal y longitudinal en la resistencia a cortante. Además, se estudio experimentalmente las diferencias de comportamiento que presentan las trabes acarteladas con las prismáticas y se evaluó la ecuación de diseño a cortante propuesta por Tena Colunga *et al.* (2008).

8.2 Conclusiones

Con base en los resultados del programa experimental, es posible realizar las siguientes conclusiones.

1. Se comprobó que efectivamente, los elementos fallaron a cortante, a excepción del elemento TASCV3 α 4-R1c.
2. El tipo de comportamiento que se observó durante el ensaye fue que la trabe prismática presentó un agrietamiento y comportamiento típico a cortante de vigas de sección constante. El comportamiento que presentaron los especímenes con ángulo de acartelamiento fue muy similar entre ellos, donde se observó que las grietas se extendían paralelamente al refuerzo longitudinal superior, en la zona del vértice y cerca de los puntos de aplicación de carga, a excepción del espécimen TASCV3 α 4-R1c. También se observó la influencia de la componente vertical del acero del refuerzo longitudinal en la resistencia y propagación de grietas en la zona de las cartelas. Además, se observó con mayor evidencia, que el elemento más acartelado que falló por cortante, que en este caso fue el TASCV3 α 3-R1c, fue en la zona del vértice donde se concentraron un mayor número de grietas. Lamentablemente, el elemento TASCV3 α 4R1c no falló como se esperaba, debido al esquema de aplicación de la carga cíclica que favoreció una falla prematura del nudo viga-columna por flexión. Queda, por lo tanto, pendiente hacer un ensaye de este espécimen ante el mismo patrón de cargas con el cual se desarrolló la falla

por cortante en el resto de los especímenes ensayados, lo cual está fuera del alcance de la presente tesis.

3. Al analizar la instrumentación interna de cada trabe, se observó que , en general, la contribución y la demanda a la que estuvieron sujetos los estribos fue mayor en aquéllos cercanos al punto de aplicación de carga, a excepción de la trabe TASCV3α0-R1c, donde la contribución y la demanda se observó cercana al nudo viga-columna. Para el refuerzo longitudinal se observó un comportamiento similar, se observó una evolución de la deformación desde el punto de aplicación de la carga hacia el nudo de la viga-columna, donde las fluencias se registraron cercanas al vértice y en los puntos de aplicación de carga.
4. En relación a la degradación de rigidez, se observó que disminuye mientras va aumentando el grado de acartelamiento. Además, se concluye que la rigidez no es igual en las cartelas que formaron al elemento.
5. Se puede concluir que conforme va aumentando el ángulo de acartelamiento, se disipa mayor cantidad de energía en comparación con los elementos de sección constante, sobre todo cuando se evalúa la disipación de energía por unidad de volumen (densidad de energía histerética).
6. Al evaluar la ecuación de diseño a cortante propuesta por Tena Colunga *et al.* (2008), se comprobó que dicha propuesta predice valores de resistencia a cortante razonables para fines de diseño.

Referencias

1. Archundia, H. I., A. Tena y O. M. González (2005), "Estudio experimental del cortante estático en trabes acarteladas de concreto reforzado", *Reporte de Investigación 453*, Departamento de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, junio 2005.
2. Archundia, H. I., A. Tena y O. M. González (2006), "Mecanismos de resistencia y deformación de trabes acarteladas de concreto reforzado". *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, vol. 11, no. 1, pp. 1-24.
3. Archundia, H. I., A. Tena, A. Grande y O. M. González (2007), "Comportamiento cíclico de trabes acarteladas de concreto reforzado sin refuerzo transversal que fallan por cortante", *Revista de Ingeniería Sísmica*, SMIS, No. 76 pp. 87-110.
4. Archundia-Aranda, H. I., A. Tena-Colunga y A. Grande-Vega (2013), "Behavior of reinforced concrete haunched beams subjected to cyclic shear", *Engineering Structures*, Vol. 49, pp. 27-42, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.10.037>.
5. Debaiky, S. Y. y E. I. El-Niema (1982). "Behavior and strength of reinforced concrete haunched beams in shear", *ACI Journal*, vol. 79, no. 3, pp. 184-194.
6. El-Niema, E. I. (1988). "Investigation of concrete haunched beams under shear", *ASCE Journal of Structural Engineering*, vol. 114, no. 4, pp. 917-930.
7. Grande, A. (2009), "Mecanismos de resistencia y deformación a cortante de trabes acarteladas de concreto reforzado sujetas a cargas cíclicas", *Tesis de Maestría*, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco.
8. López, E. (2011) "Diseño de los especímenes, cimbra, instrumentación y revisión del dispositivo de prueba de las trabes acarteladas continuas a ensayarse cíclicamente en la UAM-A", *Proyecto terminal I y II*, Universidad Autónoma Metropolitana, julio.
9. MacGregor, J. G. y J. K. Wight (2005). "*Reinforced concrete-mechanics and design*", cuarta edición, Pearson-Prentice Hall, Estados Unidos.
10. MacLeod, I. A. y A. Houmsi (1994). "Shear strength of haunched beams without shear reinforcement". *ACI Structural Journal*, vol. 91, no. 4, pp. 79-89.

11. Mendoza, L. A. (2009) "Diseño de dispositivo para trabes acarteladas continuas ante carga cíclica", *Proyecto terminal II*, Universidad Autónoma Metropolitana, diciembre.
12. Nielson, A. H. (1999), "Diseño de estructuras de concreto", duodécima edición, Mc Graw Hill, Santafé de Bogotá, Colombia, pp. 132-133.
13. NTCC-2004 (2004), "Normas Técnicas Complementarias para diseño y Construcción de Estructuras de Concreto", Gaceta Oficial del Distrito Federal, octubre.
14. Tena-Colunga A., H. I. Archundia-Aranda y O. M. González-Cuevas (2008), "Behavior of reinforced concrete haunched beams subjected to static shear loading". *Engineering Structures*, vol. 30, no. 2, pp. 478-492.

Apéndice A

Propiedades del concreto utilizado en los especímenes

A.1 Introducción

Este apéndice presenta las propiedades del concreto utilizado en la elaboración de este proyecto experimental.

A.2 Concreto

Por cada espécimen se obtuvieron siete cilindros de control (15x30cm), dos cilindros de la parte del dado, un cilindro de la parte de la unión viga-columna y, en lo que respecta a las cartelas, se obtuvieron dos cilindros de control y dos vigas (15x60cm) de cada una de ellas.

Se ensayaron a la compresión tres cilindros de cada espécimen a los 28 días después de su colado (figura A1a), dejando el resto de los cilindros y las vigas (figura A1b) para obtener su resistencia a la compresión y flexión para un día posterior al ensaye del espécimen. La resistencia nominal de diseño fue $f'_c = 250 \text{ kg/cm}^2$. Cabe señalar que los ensayos a compresión y a flexión se realizaron según la norma NMX-C-128 y NMX-C-191 respectivamente.



a)



b)

Figura A1 Ensayo de compresión a cilindro de concreto y ensayo a flexión a viga

Los cilindros se cabecearon con una pasta de azufre, con la finalidad de garantizar una superficie uniforme en los extremos. Los cilindros se llevaron a la falla y la resistencia a compresión, f'_c , obtenida de cada cilindro se consideró representativo de la resistencia a compresión en los especímenes.

En la tabla A.1 se muestran los cálculos correspondientes de cada cilindro de control de cada espécimen a la edad de los 28 días.

Tabla A.1 Propiedades del concreto utilizado en el elemento TASC*V* α i-R1c

Propiedades del concreto utilizado en el elemento TASC <i>V</i> 0 α 0-R1c a edad de 28 días								
Cilindro	D (cm)	Área (cm ²)	h (cm)	V (cm ³)	Peso (kg)	γ (kg/m ³)	P _{máx} (kg)	f' _c (kg/cm ²)
Dado	14.98	176.24	30.13	5310.22	10.18	1917.06	31715.31	179.95
Cartela Izquierda	14.84	172.96	30.16	5216.62	10.21	1957.59	30102.11	174.04
Cartela Derecha	14.96	175.77	29.83	5243.32	10.20	1945.33	29764.77	169.34

Propiedades del concreto utilizado en el elemento TASC <i>V</i> 3 α 1-R1c a edad de 28 días								
Cilindro	D (cm)	Área (cm ²)	h (cm)	V (cm ³)	Peso (kg)	γ (kg/m ³)	P _{máx} (kg)	f' _c (kg/cm ²)
Dado	15.00	176.71	29.87	5278.46	10.02	1897.33	37438.53	211.86
Cartela Izquierda	14.98	176.24	30.04	5294.36	9.97	1883.51	38126.49	216.33
Cartela Derecha	14.97	176.01	30.05	5289.05	10.12	1912.63	38113.36	216.54

Propiedades del concreto utilizado en el elemento TASC <i>V</i> 3 α 2-R1c a edad de 28 días								
Cilindro	D (cm)	Área (cm ²)	h (cm)	V (cm ³)	Peso (kg)	γ (kg/m ³)	P _{máx} (kg)	f' _c (kg/cm ²)
Dado	15.06	178.20	30.01	5347.85	10.24	1914.79	41787.42	234.49
Cartela Izquierda	15.08	178.53	30.13	5379.21	10.15	1886.52	38530.39	215.82
Cartela Derecha	15.04	177.61	30.03	5333.66	10.07	1888.01	38292.53	215.60

Propiedades del concreto utilizado en el elemento TASC <i>V</i> 3 α 3-R1c a edad de 28 días								
Cilindro	D (cm)	Área (cm ²)	h (cm)	V (cm ³)	Peso (kg)	γ (kg/m ³)	P _{máx} (kg)	f' _c (kg/cm ²)
Dado	14.94	175.30	30.09	5274.89	10.20	1932.93	47343.80	270.07
Cartela Izquierda	14.93	175.07	30.01	5253.82	10.18	1936.68	37153.50	212.22
Cartela Derecha	14.92	174.83	30.04	5252.03	10.07	1917.35	39751.70	227.37

Propiedades del concreto utilizado en el elemento TASC <i>V</i> 3 α 4-R1c a edad de 28 días								
Cilindro	D (cm)	Área (cm ²)	h (cm)	V (cm ³)	Peso (kg)	γ (kg/m ³)	P _{máx} (kg)	f' _c (kg/cm ²)
Dado	15.00	176.71	30.09	5317.34	10.80	2031.09	41787.42	236.47
Cartela Izquierda	14.90	174.37	29.92	5217.04	10.61	2033.72	38530.39	220.97
Cartela Derecha	14.92	174.83	30.10	5262.52	10.56	2006.64	38292.53	219.02

Una vez ensayado experimentalmente el espécimen, TASC*V* α i-R1c, se realizó al día siguiente el ensaye a compresión de los cilindros restantes correspondientes al espécimen ensayado, además de las vigas que se ensayaron a flexión.

En la tabla A.2 se muestra los cálculos correspondientes para cada cilindro de control y en la tabla A.3 se muestra la resistencia a la flexión del concreto que fue utilizado en las cartelas, después del ensaye del espécimen.

Tabla A.2 Propiedades del concreto utilizado en el elemento TASCVi α i-R1c día posterior a la prueba

Propiedades del concreto utilizado en el elemento TASCV0 α 0-R1c al día posterior de la prueba									
Cilindro	D (cm)	Área (cm ²)	h (cm)	V (cm ³)	Peso (kg)	γ (kg/m ³)	Pmáx (kg)	f'c(kg/cm ²)	E (kg/cm ²)
Dado	14.96	175.77	30.10	5290.78	10.05	1900.10	51842.70	294.94	122443.00
Cartela Izquierda	14.98	176.24	30.18	5319.03	9.98	1876.28	51506.40	292.25	125685.00
Cartela Derecha	14.94	175.30	30.17	5288.91	10.11	1911.55	54410.20	310.38	128891.00
Nodo	15.04	177.66	30.14	5354.62	10.06	1877.82	53942.90	303.63	125007.00

Propiedades del concreto utilizado en el elemento TASCV3 α 1-R1c al día posterior de la prueba									
Cilindro	D (cm)	Área (cm ²)	h (cm)	V (cm ³)	Peso (kg)	γ (kg/m ³)	Pmáx (kg)	f'c(kg/cm ²)	E (kg/cm ²)
Dado	14.95	175.54	30.04	5273.18	9.90	1876.86	46058.65	262.38	107750.00
Cartela Izquierda	14.93	175.07	29.89	5232.82	10.02	1915.60	47106.91	269.08	130628.00
Cartela Derecha	14.85	173.20	29.97	5190.74	9.95	1917.07	47110.87	272.01	123893.00
Nodo	14.90	174.37	29.92	5217.04	10.61	2033.72	46904.26	269.00	130610.00

Propiedades del concreto utilizado en el elemento TASCV3 α 2-R1c al día posterior de la prueba									
Cilindro	D (cm)	Área (cm ²)	h (cm)	V (cm ³)	Peso (kg)	γ (kg/m ³)	Pmáx (kg)	f'c(kg/cm ²)	E (kg/cm ²)
Dado	14.92	174.79	29.68	5186.83	10.19	1964.40	50606.70	289.53	125061.00
Cartela Izquierda	15.04	177.61	30.13	5351.42	10.15	1896.32	50882.90	286.48	119648.00
Cartela Derecha	15.08	178.53	30.03	5361.36	10.07	1878.25	50689.00	283.92	117833.00
Nodo	14.97	175.96	29.88	5257.73	10.13	1927.07	51305.00	291.57	116034.00

Propiedades del concreto utilizado en el elemento TASCV3 α 3-R1c al día posterior de la prueba									
Cilindro	D (cm)	Área (cm ²)	h (cm)	V (cm ³)	Peso (kg)	γ (kg/m ³)	Pmáx (kg)	f'c(kg/cm ²)	E (kg/cm ²)
Dado	14.94	175.30	29.89	5239.83	10.20	1945.67	52504.20	299.50	127583.00
Cartela Izquierda	14.93	175.07	30.05	5259.95	10.18	1934.43	44724.60	255.47	124279.00
Cartela Derecha	14.92	174.83	29.98	5241.54	10.07	1921.76	46091.70	263.63	120967.00
Nodo	15.00	176.71	29.77	5260.79	10.04	1908.27	43138.60	244.11	114335.00

Propiedades del concreto utilizado en el elemento TASCV3 α 4-R1c al día posterior de la prueba									
Cilindro	D (cm)	Área (cm ²)	h (cm)	V (cm ³)	Peso (kg)	γ (kg/m ³)	Pmáx (kg)	f'c(kg/cm ²)	E (kg/cm ²)
Dado	15.00	176.71	30.09	5317.34	10.33	1943.45	63012.12	356.58	136776.00
Cartela Izquierda	15.00	176.71	30.05	5310.27	10.24	1928.34	57649.53	326.23	122525.00
Cartela Derecha	14.98	176.24	30.10	5304.93	10.07	1898.23	56738.38	321.93	124604.00
Nodo	15.10	179.08	30.05	5381.31	10.61	1971.64	63453.30	354.33	127266.00

Tabla A.3 Resistencia a la flexión del concreto utilizado en el elemento TASCViαi-R1c día posterior a la prueba

Resistencia a la flexión del concreto utilizado en los especímenes viga cartela derecha					
Espécimen	b (cm)	d (cm)	L (cm)	Pmax (kg)	R (kg/cm²)
TASCV0a0-R1c	15.00	15.00	45.00	2234.80	29.80
TASCV3a1-R1c	15.00	15.00	45.00	2164.34	28.86
TASCV3a2-R1c	15.00	15.00	45.00	1672.60	22.30
TASCV3a3-R1c	15.00	15.00	45.00	1709.50	22.79
TASCV3a4-R1c	15.00	15.00	45.00	1449.33	19.32

Resistencia a la flexión del concreto utilizado en los especímenes viga cartela izquierda					
Espécimen	b (cm)	d (cm)	L (cm)	Pmax (kg)	R (kg/cm²)
TASCV0a0-R1c	15.00	15.00	45.00	2438.60	32.51
TASCV3a1-R1c	15.00	15.00	45.00	2102.37	28.03
TASCV3a2-R1c	15.00	15.00	45.00	1582.00	21.09
TASCV3a3-R1c	15.00	15.00	45.00	1848.70	24.65
TASCV3a4-R1c	15.00	15.00	45.00	1561.44	20.82